



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**VYUŽITÍ NALEPOVACÍCH TENZOMETRU PRO  
STANOVENÍ TLAKU V POTRUBÍ**

DETERMINATION OF PRESSURE IN THE PIPE USING FOIL STRAIN GAUGE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Vojtěch Beran**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.**

**BRNO 2017**



## Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: Bc. Vojtěch Beran  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Fluidní inženýrství  
Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Využití nalepovacích tenzometru pro stanovení tlaku v potrubí

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při měření tlaku v hydraulických systémech se setkáváme s případy, kdy nejsou připravené tlakové odběry a jejich příprava by byla příliš nákladná, nebo neproveditelná (např. v systémech jaderná energetiky). V těchto případech je možno využití nalepovacích tenzometrů na potrubí a z napjatosti v potrubí usuzovat na hodnotu tlaku uvnitř. Úkolem diplomanta bude navržení experimentu, provedení měření a vyhodnocení takto naměřených dat včetně stanovení omezujících podmínek a porovnání shody měřených tlaků a tlaků vyhodnocených z tenzometrů.

#### Cíle diplomové práce:

Literární rešerše problematiky.

Navržení experimentu.

Vyhodnocení tlaků s tenzometrického měření.

Porovnání měřených tlaků a tlaků vyhodnocených z tenzometrů.

Navržení postupu měření tlaku pomocí nalepovacích tenzometrů v reálném případě.

#### Seznam literatury:

VLK, Miloš et al.: Experimentální mechanika. Brno, 2003. Dostupné z:  
<http://www.umt.fme.vutbr.cz/cz/studium/studijni-materialy.html>

ONDRÁČEK, Emanuel, VRBKA, Jan, JANÍČEK, Přemysl a BURŠA, Jiří.: Mechanika těles: pružnost a pevnost II. 4. přeprac. vyd. Brno: CERM, 2006, 262 s. ISBN 80-214-3260-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá využitím nalepovacích tenzometrů pro stanovení tlaku v potrubí. Jedná se o výpočet tlaku z měřené deformace. Cílem této práce je navrhnout matematicko-technické modely k určení vnitřního tlaku potrubí z podélných přetvoření. Navržené modely byly použity na data z provedeného experimentu a výsledky byly porovnány se skutečnými tlaky v potrubí. Práce obsahuje tři modely, které byly vzájemně porovnány. U dvou modelů byla provedena citlivostní analýza.

Práce také obsahuje úvodní rešerši problematiky tenzometrů. Do této teoretické části patří i popsání základních znalostí mechaniky těles se zaměřením na tenkostěnné skořepiny.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Tenzometr, potrubí, přetvoření, napjatost, skořepina, tlak, citlivostní analýza, výpočetní model

## ABSTRACT

This master's thesis deals with determination of pressure in the pipe using foil strain gauge. It is calculation of the pressure from the measured strain. The main purpose of this work is devise mathematical-technological models to determinate internal pipe pressure from longitudinal deformation. Devised models were used on data from realized experiment and results were compared with real value of pressures in pipes. This thesis contains three models which were mutually compared. Sensitivity analysis were done on two of these models.

Thesis also contains opening research of strain gauge problematics. Description of basic knowledge of physical objects mechanic with focusing on shells also belongs to this theoretical part.

## KEYWORDS

Strain gauge, pipe, strain, stress, shell, pressure, sensitivity analysis, computational model



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BERAN, V. Využití nalepovacích tenzometrů pro stanovení tlaku v potrubí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.





## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Využití nalepovacích tenzometrů pro stanovení tlaku v potrubí* vypracoval samostatně pod odborným vedením doc. Ing. Vladimíra Habána, Ph.D. s využitím informací a zdrojů, které jsou řádně uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 23. Května 2017

.....

Vojtěch Beran



## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a ochotu při řešení problémů. Dále bych rád poděkoval rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu studia podporovali. Děkuji ti, mami.



# OBSAH

ÚVOD.....	15
1 MECHANIKA TĚLES.....	16
1.1 Deformace a napjatost tělesa .....	16
1.2 Membránová teorie skořepin .....	17
1.2.1 Tenkostěnná tělesa.....	17
1.2.2 Skořepiny.....	17
1.2.3 Membránová teorie skořepin .....	18
2 ODPOROVÁ TENZOMETRIE .....	22
2.1 Princip odporových tenzometrů.....	22
2.2 Vlastnosti tenzometrů .....	23
2.2.1 k-faktor .....	23
2.2.2 Příčná citlivost .....	24
2.2.3 Hystereze .....	24
2.2.4 Nelinearita .....	25
2.2.5 Linearita.....	25
2.2.6 Reprodukovatelnost.....	25
2.2.7 Relaxace .....	25
2.2.8 Únava tenzometru.....	25
2.2.9 Vliv teploty .....	26
2.2.10 Vliv vlhkosti .....	26
2.2.11 Vliv hydrostatického tlaku .....	26
2.3 Rozdělení odporových tenzometrů .....	26
2.3.1 Kovové tenzometry .....	26
2.3.2 Polovodičové tenzometry .....	27
2.4 Druhy odporových tenzometrů .....	27
2.4.1 Rovinná napjatost .....	28
2.5 Instalace tenzometrů .....	30
2.5.1 Lepení .....	30
2.5.2 Difúzní metoda .....	31
2.5.3 Přivařování .....	31
3 MĚŘENÍ TLAKU .....	32
3.1 Tlak .....	32

3.2 Druhy tlakoměrů .....	33
3.2.1 Dělení podle velikosti a typu měřeného tlaku.....	33
3.2.2 Dělení podle stupně přesnosti .....	33
3.2.3 Dělení podle fyzikálního principu měření .....	33
3.3 Instalace tlakoměrů .....	34
4 EXPERIMENT .....	35
4.1 Měřicí trať .....	35
4.2 Měřicí technika .....	36
5 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ .....	38
5.1 Příprava dat .....	38
5.2 Tenkostěnný model .....	39
5.3 Silnostěnný model.....	43
5.4 Citlivostní analýza.....	47
5.4.1 Vliv změny modulu pružnosti v tahu (E).....	47
5.4.2 Vliv změny přetvoření ( $\epsilon$ ) .....	48
5.4.3 Vliv změny Poissonova čísla ( $\mu$ ) .....	49
5.4.4 Vliv změny vnitřního poloměru (R) .....	50
5.4.5 Vliv změny tloušťky stěny ( $\Delta$ ).....	51
5.5 Kalibrační model.....	53
5.5.1 Zpětné stanovení modulu pružnosti v tahu .....	55
6 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	58
7 NAVRŽENÍ POSTUPU MĚŘENÍ .....	63
ZÁVĚR .....	64
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	66
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	68
SEZNAM TABULEK.....	68
SEZNAM GRAFŮ.....	69

## ÚVOD

V současnosti je měření tlaků nedílnou součástí většiny technických provozů a zaujímá velmi důležité postavení při laboratorních i experimentálních pracích. Je tedy logické, že množství aplikací, které požadují snímání tlaku, pokládá na toto měření rozdílné nároky, a proto jsou neustále vyvíjeny nové tlakoměry a postupy ke stanovení této klíčové veličiny. Pro měření tlaku v potrubí požadují běžné tlakoměry přípravu odběrových míst, což obvykle vede k narušení povrchu potrubí, a to není vždy přípustné, popřípadě proveditelné, proto by bylo vhodné provádět měření tlaku bez tohoto zásahu. Pro tyto aplikace se tedy hledají jiné postupy měření.

Tato práce se zabývá problematikou měření tlaku v potrubí jednou z těchto neobvyklých metod, která je založena na vyhodnocování deformace potrubí. Měření deformace je poměrně běžná záležitost, která se dá provést celou řadou zařízení a postupů. Nejčastější, a i v této práci použitý, je měření deformace pomocí tenzometrů, jejichž výstupem jsou poměrná přetvoření. Pomocí znalostí z mechaniky těles, lze stanovit matematické modely pro přepočítání měřeného přetvoření na vnitřní tlak potrubí.

Podle zadaných cílů lze tuto diplomovou práci rozdělit do několika částí, které jsou vzájemně provázané, a vypuštění jednoho z oddílů by mohlo vést k nepochopení ostatních kapitol. První část se zabývá osvětlením základních znalostí několika vědních oborů, které jsou s touto prací úzce svázány. V této rešeršní části se autor mimo jiné zabývá popisem základů mechaniky těles a měření tlaků, ale hlavní prostor byl věnován tenzometrům se zaměřením na odporové tenzometry. Kromě samotného principu těchto snímačů je popsáno i rozdělení, vlastnosti a připevňování tenzometrů.

Druhým úsekem diplomové práce je experiment, který je často nedílnou součástí odvozování nových metod, bez které by nebylo možné navržené matematické modely ověřit. Následující a velmi důležité oddíly důsledně popisují vyhodnocení provedeného experimentu, včetně porovnání všech navržených modelů na měřených datech. Za účelem lepšího popsání odvozených modelů byla provedena jejich citlivostní analýza.

V cílech práce vystupuje také navržení postupu měření tlaku pomocí nalepovacích tenzometrů pro reálný případ, čemuž je věnována krátká kapitola v závěrečné části práce.

# 1 MECHANIKA TĚLES

Tato kapitola se zabývá vysvětlením základních pojmů mechaniky těles a popsáním některých principů tohoto vědního okruhu. Vybrané pojmy byly zvoleny tak, aby co nejlépe shrnuly problematiku, s kterou pracuje tato práce v pozdějších kapitolách a to především v kapitole, zabývající se vyhodnocením experimentu. Některé pojmy jsou ještě dovysvětleny a popsány v následující kapitole, která popisuje tenzometry, protože právě pomocí těchto snímačů je zaznamenávána deformace tělesa.

## 1.1 Deformace a napjatost tělesa

Deformace tělesa je běžně popisována deformací každého elementu tělesa, přičemž jako deformace je zde považována změna rozměrů a tvaru jednotlivých elementů. Z pravidla je deformace elementu určena pomocí délkových přetvoření  $\varepsilon$  a úhlových přetvoření  $\gamma$ , které pro úplný popis tvoří tenzor druhého řádu, který je označován jako tenzor přetvoření  $T_\varepsilon$ . [1]

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{zy}}{2} \\ \frac{\gamma_{xz}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad 1.1$$

Podobný tenzor slouží také k popisu napjatosti v okolí obecného bodu tělesa. Je označován jako tenzor napětí  $T_\sigma$  a skládá se z normálových napětí  $\sigma$  a smykových napětí  $\tau$ , přičemž tyto napětí jsou závislé na zatížení, tvaru a materiálových vlastnostech tělesa. Pro normálové napětí byla zavedena znaménková konvence a to tak, že kladné normálové napětí označuje tah a záporné tlak. Popis napjatosti tělesa lze opět provést pomocí dílčích napjatostí všech bodů tělesa. [1] [2]

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad 1.2$$

Tenzor napětí je možné přepsat do tvaru 2.3, kde vystupují napětí  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$ . Tyto napětí jsou označovány jako hlavní normálové napětí, která leží v hlavní rovině. To je rovina, v které nepůsobí smyková napětí. [1] [3]

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad 1.3$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad 1.4$$



## 1.2 Membránová teorie skořepin

V této podkapitole jsou popsány skořepiny, s hlavním zaměřením na rotačně symetrické membránové skořepiny, jejichž teorie je použita k návrhu vyhodnocení tlaku z měřené deformace.

### 1.2.1 Tenkostěnná tělesa

Tenkostěnná tělesa jsou teoretická tělesa, která splňují předpoklady tenkostěnnosti, do kterých se řadí geometrické, zatěžovací, deformační a napjatostní podmínky.

Geometrické předpoklady popisují tenkostěnná tělesa jako tělesa plně určená střednicovou plochou  $\Gamma$ , v jejímž každém bodě je známá tloušťka stěny na normále  $n$ , přičemž tloušťka stěny musí být souměrně rozdělena vzhledem ke střednicové ploše a musí být mnohonásobně menší než zbylé dva rozměry. Samotná střednicová plocha je pak popisována jako spojitá a hladká plocha s konečnými rozměry. [4]

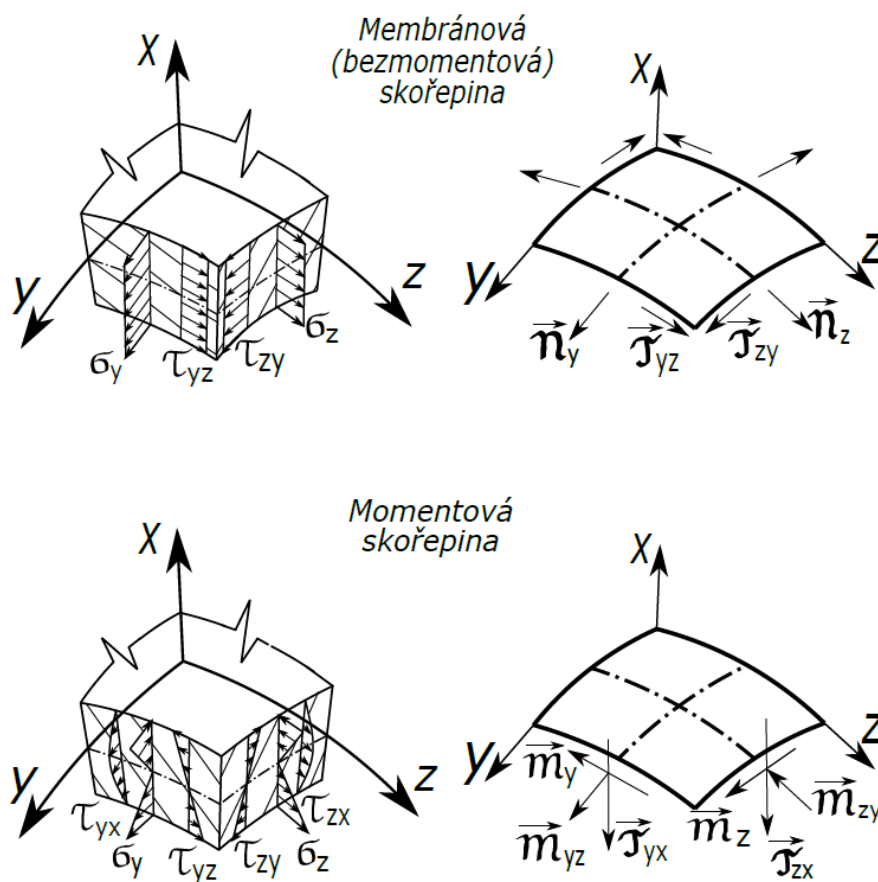
Zatěžovací podmínky vycházejí z toho, že všechny vnější síly působí na tenkostěnné těleso pouze v bodech střednicové plochy. Podobný předpoklad se týká vazeb, které mohou omezovat pouze posuvy a úhly natočení střednicové plochy. [4]

Hlavní deformační podmínka je založena na zachování rovinnosti normálových řezů. Tedy nedochází ke zborcení a body ležící na normále  $n$  střednicové plochy  $\Gamma$  před deformací zaujmají nová místa na normále  $n'$  střednicové plochy  $\Gamma'$  po deformaci. Poslední skupina předpokladů se zabývá popisem napjatosti, která je určena normálovými a tečnými napětími ve dvou vzájemně kolmých normálových řezech. Normálová napětí ve střednicovém řezu jsou považována za nepodstatná a uvažují se jako nulová. [4] [5]

Tenkostěnná tělesa se rozdělují na stěny, desky, stěnodesky a skořepiny. Toto rozdělení se provádí především podle průběhu napětí, typu napjatosti a tvaru střednicových ploch. Pro tuto práci jsou dále důležité pouze skořepiny a to především membránové skořepiny.

### 1.2.2 Skořepiny

Jak již bylo zmíněno, jsou to tenkostěnná tělesa tvořená zakřivenou střednicovou plochou. V podstatě se jedná o plošné konstrukce, které se dají dále dělit na obecnou skořepinu, membránovou skořepinu a momentovou skořepinu. Ty se liší podle průběhu napětí. U obecné skořepiny nemá průběh napětí po tloušťce stěny předepsanou formu, jako tomu je u zbylých dvou typů, jejichž průběhy napětí jsou znázorněny na *Obr. 1.1*. Z logické analogie se tedy zavádí pojmy jako membránová a momentová napjatost. Při momentovém stavu napjatosti se normálová napětí, která jsou z pravidla u tohoto namáhání nejvýznamnější, po tloušťce mění. U membránové napjatosti jsou pak normálová napětí po tloušťce stěny konstantní. Blíže budou tyto napjatostní stavy popsány v následující podkapitole. [4] [5]



Obr. 1.1: Průběhy napětí skořepin (upraveno dle [4])

Další dělení skořepin může být podle geometrie, kde je důležité zavést pojem rotačně symetrická skořepina. Je to druh skořepiny, jejíž střednicovou plochu definuje osa rotační symetrie skořepiny a tvořící křivka (meridián), který kolem této osy rotuje. [5]

### 1.2.3 Membránová teorie skořepin

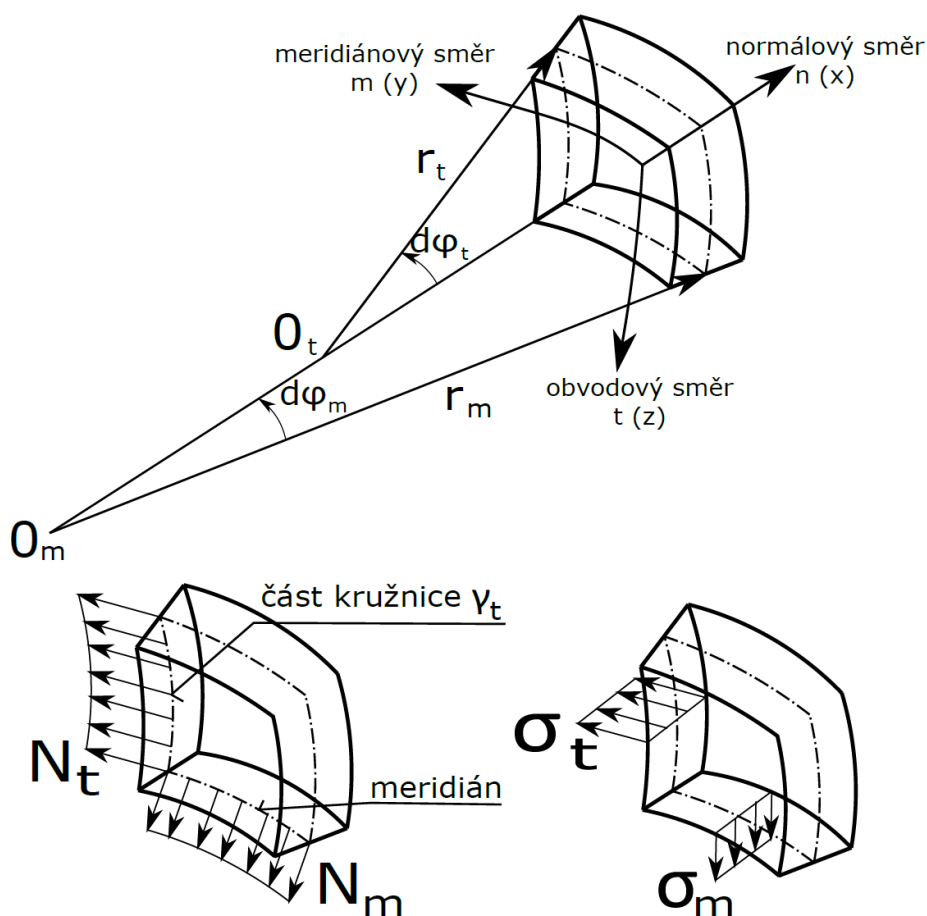
Hlavním předpokladem membránové (bezmomentové) teorie skořepin je, že těleso přenáší pouze membránové síly a to jsou síly na povrchu skořepiny nebo síly v rovinách tečných k povrchu skořepiny. Jinak řečeno, to znamená, že zde nepůsobí momentové síly, které jsou kolmé k povrchu skořepin, a jedná se tedy o skořepinu namáhanou dvouosou membránovou napjatostí. Pro tento případ lze uvažovat dva hlavní směry napětí a to meridiánový, který je rovnoběžný s osou, a obvodový, který je tečný ke tvořící křivce. Napětí v normálovém směru je konstantní. [4] [5] [6]

Aby se mohla skořepina považovat za membránovou, tak musí splňovat tyto kritéria [4] [6]:

- Zatížení kolmé k povrchu musí být spojitě nebo velmi málo proměnné.
- Vnější síly musí být tečné k povrchu a to včetně vazebných sil.
- Deformace skořepiny nesmí být v radiálním směru omezována.
- Nesmí docházet ke skokové změně tloušťky skořepiny.
- Nesmí docházet ke skokovým změnám křivosti střednicové plochy (musí být hladká).

Z toho vyplývá, že v místech podepření nebo ukončení skořepin se membránový stav mění na momentový, ale z praxe je známo, že momentové síly se rychle utlumují se vzdáleností od zdroje této změny. K podobnému jevu dochází i v blízkosti trhlin, skokových změn tloušťky skořepiny, vyboulení skořepiny nebo dalších defektů a ohnisek osamocených sil. [5] [7]

Pro následující odvození vzorců této teorie se bude vycházet z řešení rotačně symetrické skořepiny. To znamená, že geometrie, vazby, napjatost i deformace jsou rotačně souměrné. Na *Obr. 1.2* je uvolnění a rovnováha elementárního prvku skořepiny.



$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

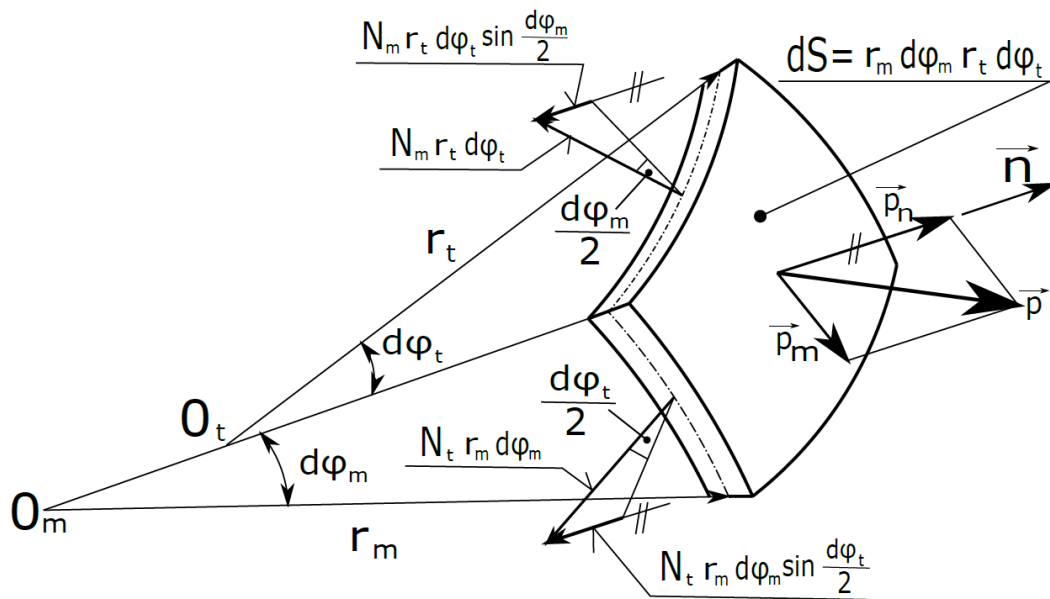
**Obr. 1.2:** Uvolnění a rovnováha elementárního prvku membránové skořepiny (upraveno dle [4])

Na kružnici  $\gamma_t$  a na meridiánu působí liniové membránové zatížení a to ve formě meridiánové síly  $N_m$  a obvodové síly  $N_t$ , které jsou s napětími  $\sigma_m$  a  $\sigma_t$  provázány vztahy 1.5 a 1.6, kde proměnná  $\Delta$  představuje tloušťku stěny elementárního prvku skořepiny. [4]

$$\sigma_m = \frac{N_m}{\Delta} \quad 1.5$$

$$\sigma_t = \frac{N_t}{\Delta} \quad 1.6$$

Dalším krokem bylo nutné stanovit rovnici rovnováhy uvolněného elementárního prvku. Z Obr. 1.3 lze stanovit vztahy 1.7, 1.8 a 1.9, které platí pro plošné zatížení, meridiánové síly a obvodové síly. [4]



Obr. 1.3: Úplné uvolnění elementárního prvku skořepiny (upraveno dle [4])

Plošné zatížení:  $p_n \cdot r_m \cdot d\varphi_m \cdot r_t \cdot d\varphi_t \quad 1.7$

Meridiánové síly:  $2 \cdot N_m \cdot r_t \cdot d\varphi_t \cdot \sin \frac{d\varphi_m}{2} \quad 1.8$

Obvodové síly:  $2 \cdot N_t \cdot r_m \cdot d\varphi_m \cdot \sin \frac{d\varphi_t}{2} \quad 1.9$

Rovnici rovnováhy elementárního prvku ve směru normály  $n$ , lze napsat ve tvaru 1.10. [4]

$$p_n \cdot r_m \cdot d\varphi_m \cdot r_t \cdot d\varphi_t - 2 \cdot N_m \cdot r_t \cdot d\varphi_t \cdot \sin \frac{d\varphi_m}{2} - 2 \cdot N_t \cdot r_m \cdot d\varphi_m \cdot \sin \frac{d\varphi_t}{2} = 0 \quad 1.10$$

$$\sin \frac{d\varphi}{2} \doteq \frac{d\varphi}{2} \quad 1.11$$

V případě, že je uvažován vztah pro malé úhly 1.11 a rovnice rovnováhy 1.10 je vydělena činitelem  $r_m \cdot d\varphi_m \cdot r_t \cdot d\varphi_t$ , lze přepsat rovnici rovnováhy do tvaru 1.12 nebo 1.13, tyto dva vztahy se obvykle označují jako Laplaceovy rovnice. [4]

$$\frac{N_m}{r_m} + \frac{N_t}{r_t} = p_n \quad 1.12$$

$$\frac{\sigma_m}{r_m} + \frac{\sigma_t}{r_t} = \frac{p_n}{\Delta} \quad 1.13$$

Laplaceovy rovnice jsou velmi přínosné pro řešení membránových skořepin, ale nelze je aplikovat na řešení momentových skořepin a to včetně nádob zatížených vnějším tlakem. Pro tyto případy je nutné použít momentovou teorii skořepin, která je výrazně složitější. [4] [7]

## 2 ODPOROVÁ TENZOMETRIE

V dnešní době je velmi důležité posuzovat a měřit deformaci a povrchové napětí zkoumaných těles. Tyto měřené hodnoty jsou velmi podstatné pro kvalitativní zkoušky, posuzování životnosti, stanovování maximálních zatížení a mnoho dalších funkcí. Proto je vyhodnocování napětí a deformací pro mnoho oborů již dnes nepostradatelné.

Napětí, ale nelze měřit přímo, musí se stanovit z naměřených hodnot jiné veličiny, například ze síly, kterou lze určit při tahové zkoušce, nebo z hodnot přetvoření, a právě z hodnot přetvoření se obvykle u reálných součástí pomocí materiálových charakteristik určuje napětí. Vedle mnoha jiných měření napětí a deformací je nejpoužívanější metodou právě tenzometrie.

Tenzometrické snímače lze rozdělit podle toho, na kterém fyzikálním principu jsou založeny, a proto rozeznáváme kapacitní tenzometry, rezonanční neboli strunové tenzometry, tenzometry z nestabilních magnetických slitin a odporové tenzometry. Přičemž odporové tenzometry jsou nejpoužívanější a byly použity i v této diplomové práci. [8]

Odporová tenzometrie je řazena do skupiny experimentálních metod spadajících pod mechaniku těles. Již v roce 1856 popsal lord Kelvin závislost odporu elektrického vodiče na jeho prodloužení, čímž objevil fyzikální podstatu odporových tenzometrů, ale první experimenty s předchůdci dnešních snímačů se začaly objevovat až na začátku dvacátého století. Nejdříve se jednalo o pokusy s volným drátem a lepeným uhlíkovým tenzometrem, ale už v 30. letech 20. století vznikl první drátkový tenzometr dnešního typu. [9]

Tenzometry se dále vyvíjely a zdokonalovaly a i dnes jejich vývoj stále pokračuje. Výrobci neustále pracují na nových typech a vylepšují stávající, tak aby splňovaly ty nejnáročnější provozní podmínky. Největší uplatnění získaly odporové tenzometry v oblasti experimentální analýzy napětí, sil, tlaků a krouticích momentů. Dále se, ale uplatňují při měření posunutí, výchylek a zrychlení kmitavého pohybu nebo při konstrukci snímačů tlaků, sil a zatížení.

### 2.1 Princip odporových tenzometrů

Odporové tenzometry vycházejí z principu, že v případě jejich umístění na deformující se povrch materiálu, se přenáší změna rozměrů i na ně a tím se mění jejich odpor. Tato změna odporu je zaznamenávána a pomocí ní je zpětně určována deformace měřeného objektu.

Využívá se znalosti toho, že deformace elektrického vodiče ovlivňuje jeho odpor. Závislost odporu na geometrii vodiče, lze pak popsat vztahem 2.1. Z toho vychází, že v případě zatížení dojde ke změně délky  $\Delta l$  a ke změně průměru vodiče  $\Delta D$ , který souvisí s velikostí průřezu  $S_v$ , a nastane změna odporu  $dR$ . Změna odporu lze popsat parciální derivací 2.2. Kromě již zmíněných proměnných a konstant se v této rovnici objevila měrná rezistivita (měrný odpor)  $\rho$ , která charakterizuje vodivostní, respektive odporový vlastnosti látek vedoucích elektrický proud. [9] [10]

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S_v} \quad 2.1$$

$$dR = d\rho \cdot \frac{l}{S_v} + dl \cdot \frac{\rho}{S_v} - \frac{dS_v}{S_v^2} \cdot \rho \cdot l \quad 2.2$$

Důležitou materiálovou konstantou, která zde také vystupuje, je Poissonovo číslo  $\mu$ , které je charakterizováno jako podíl poměrné deformace v příčném směru  $\psi$  a poměrné deformace v podélném směru  $\varepsilon$ . Pomocí Poissonova čísla  $\mu$  lze vyjádřit vztah 2.5, který odpovídá jednomu členu z rovnice 2.2 [10]

$$\mu = \frac{\psi}{\varepsilon} \quad 2.3$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad 2.4$$

$$\frac{dS_v}{S_v^2} = -2 \cdot \mu \cdot \frac{dl}{l} \quad 2.5$$

Poměrnou změnu odporu  $dR/R$  lze pak zformulovat pomocí předchozích rovnic do tvaru 2.6. Měrný odpor  $\rho$  je materiálová konstanta závislá na teplotě, a protože je teplota u tenzometrů kompenzována, tak člen s  $d\rho$  se dále neuvažuje. Vliv teploty je zmíněn i v následující podkapitole. [10]

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon \cdot \left( \frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{l}{\varepsilon} + 1 + 2 \cdot \mu \right) \quad 2.6$$

U metalických odporových tenzometrů lze použít vztah 2.7, popřípadě 2.8. [10]

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2 \cdot \mu) \frac{\Delta l}{l} \quad 2.7$$

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad 2.8$$

Ve vztahu 2.8 symbolizuje deformační součinitel citlivosti  $k$ , tzv. k-faktor, který je podrobněji popsán v podkapitole 2.2 *Vlastnosti tenzometrů*.

## 2.2 Vlastnosti tenzometrů

V této podkapitole jsou rozebrány nejdůležitější vlastnosti tenzometrů a vlivy, které ovlivňují tenzometrické měření.

### 2.2.1 k-faktor

Jedná se o bezrozměrnou konstantu, která zahrnuje vliv materiálu vodiče a druhu tenzometru. Jeho hodnota je určována experimentálně. Je uváděna výrobcem na obalu a to včetně tolerance. Jeho velikost se pohybuje řádově v jednotkách až stovkách. Kovové tenzometry se nejčastěji vyrábí z konstantanu, pro který je k-faktor roven zhruba 2,05. U polovodičových tenzometrů je pak tento součinitel vyšší, například pro křemík typu P je přibližně roven 125. [9] [10]

Obecně se uvádí, že s rostoucím k-faktorem roste i citlivost snímače. Na druhou stranu, ale s jeho růstem souvisí i rostoucí závislost na teplotě. Výrobce pak udává přepočet, kterým lze stanovit tento teplotní vliv, a lze tedy určit k-faktor pro teplotu měřeného místa. [9]

### 2.2.2 Příčná citlivost

Jedná se o parazitní vliv, který negativně ovlivňuje přesnost měření a vede ke vzniku chyby. V zásadě jde o to, že dochází k deformaci i ve směru příčném k ose snímače a nejen v tzv. *aktivní délce*. Z tohoto důvodu musí být definován součinitel příčné citlivosti tenzometru  $q$ . [9]

$$q = \frac{k_t}{k_l} \quad 2.9$$

Ve vztahu 2.9 vystupují deformační součinitelé tenzometru ve směru aktivní délky  $k_l$  a ve směru kolmém na aktivní délku  $k_t$ , které lze definovat jako [9]:

$$k_l = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_l} \quad 2.10$$

$$k_t = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_t} \quad 2.11$$

Vliv příčné citlivosti se obvykle snižuje zesílením vodiče na koncích smyček v měřicí mřížce, což vede ke koncentraci příčného přetvoření  $\varepsilon_t$  na menší prostor a sníží se vliv na celou aktivní délku. Dalším způsobem je pak konstruování snímačů, s co nejmenší šířkou. [9] [11]

Po tenzometrech se požaduje, aby hodnota součinitele příčné citlivosti byla menší než 0,02, ale běžně se pohybuje dokonce pod hodnotou 0,008. [9]

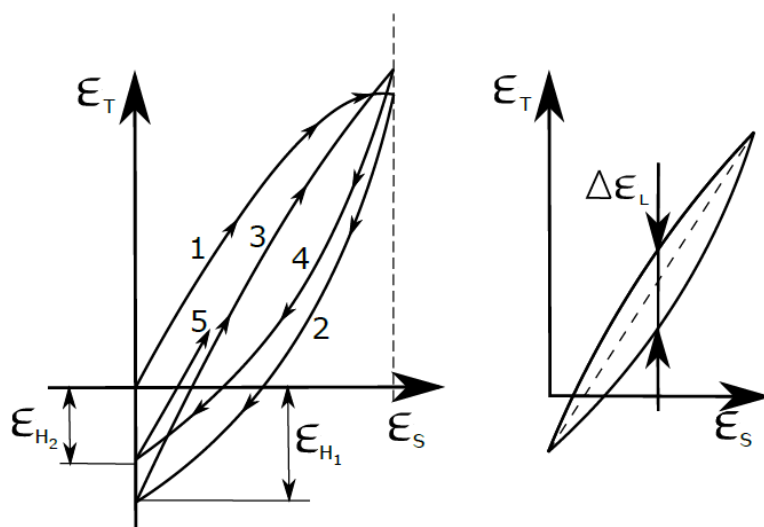
### 2.2.3 Hystereze

Hystereze je dalším vlivem, který snižuje přesnost samotného měření. Jedná se v podstatě o maximální odchylku mezi dvěma hodnotami deformace při stejném zatížení. Přičemž jedna hodnota je stanovena při stoupajícím zatížení z nuly do jmenovitého zatížení a druhá se stanoví při odlehčení ze jmenovitého zatížení až na nulu. A právě po odlehčení se nevrátí hodnota přesně do počátku, ale bude vykazovat drobnou deformaci. [9] [10] [11]

Hystereze je obvykle popisována pomocí tzv. hysterezní smyčky, která by se v ideálním případě zobrazila jako čára totožná pro zatěžování i odlehčování. Snížení vlivu hystereze se dá docílit zvýšením počtu zátěžových cyklů před měřením, protože se hystereze postupně snižuje, až se ustálí na určité konstantní hodnotě  $\Delta\varepsilon_L$ . Na Obr. 2.1 je znázorněna hysterezní smyčka a vliv počtu zátěžových cyklů. [9] [11]

Velikost celkové hystereze závisí jak na tenzometru, tak například i na materiálu měřeného tělesa a kvalitě připevnění. Obvykle se pohybuje do 0,5 % měřené deformace, ale především nevhodný materiál může vést k vyšším vlivům. [9]





Obr. 2.1: Hysterezní smyčka (upraveno dle [9])

#### 2.2.4 Nelinearita

Jedná se o největší hodnotu odchylky mezi kalibrační křivkou a přímkou vedenou v definovaném rozsahu zatížení. Přičemž přímka je volena tak, aby odchylka pro tento rozsah byla, co nejmenší. Kalibrační křivka vyznačuje skutečné chování tenzometru. [9]

#### 2.2.5 Linearita

Závislost změny odporu na přetvoření není úplně lineární, ale lze jí tak uvažovat. Relativní chyba obvykle nepřesahuje 0,1 %. [9]

#### 2.2.6 Reprodukovatelnost

Jedná se o maximální rozdíl měřených hodnot jednoho tenzometru při opakujícím se způsobu zatěžování za stejných podmínek. [9]

#### 2.2.7 Relaxace

V případě dlouhodobého zatěžování součásti se, i při konstantní deformaci, měřená data v čase mění a to z důvodu prokluzu tenzometru po součásti. Odchylka se obvykle pohybuje pod 1 %. [9]

#### 2.2.8 Únava tenzometru

Při cyklickém zatěžování se u tenzometrů začne projevovat únavové porušení a to především v měřicí mřížce. V podložce se začne objevovat únavové porušení obvykle mnohem později a to z důvodu vyšší tuhosti. Únava poté vede k posuvu nulového bodu a tím ke vzniku chyby měření a celkově k nevratnému poškození. Výrobce udává vztahy popisující tuto problematiku. [9] [11]

Z pohledu únavy je vhodné volit tenzometry s delší mřížkou, protože experimentálně bylo ověřeno, že lépe snášejí vliv únavového porušení. [9]

### 2.2.9 Vliv teploty

U tenzometrů nelze vliv teploty zanedbat, protože teplota ovlivňuje hodnotu k-faktoru, měřený odpor a i vlastnosti podložky, lepidla a měřené součásti. Problém většinou nespočívá v samotné hodnotě teploty, ale v kolísání teploty, kdy dochází k jmenovaným změnám, se kterými si běžný tenzometr nemusí poradit. V případě, že se vliv teploty nedá vyloučit, tak lze zkrácení dat aspoň částečně předejít několika opatřeními. Je možné použít další tenzometr ke kompenzaci, nebo přímo autokompenzační tenzometr. Tomuto vlivu se dá také předcházet zapojením do mostu. Poslední možností je pak samotná korekce naměřených výsledků, přičemž korekční funkci obvykle výrobci uvádějí na balení. [9] [10]

### 2.2.10 Vliv vlhkosti

Vlhkost může být příčinou nezanedbatelné chyby při měření, protože může z okolí pronikat do podložky nebo lepidla a měnit tak jejich fyzikální vlastnosti. Dochází také k vyduť, popřípadě pokrčení umístěného tenzometru, což v nejhorším případě může vést až k odlepení snímače. Vlhkost je také schopná zapříčinit postupnou korozi měřící mřížky. Z těchto důvodů je nutné ve vlhkém prostředí použít určité ochranné prostředky a dodržet pokyny od výrobce k jejich použití. [9]

### 2.2.11 Vliv hydrostatického tlaku

Uvádí se, že tenzometry vydrží tlak až 1 000 MPa bez poškození. Přičemž tlak může vést k malé změně odporu, což vede ke vzniku chyby měření. Při běžném použití, ale lze tento vliv zanedbat. Důležitější je vliv tlaku na lepení tenzometru, kdy je nutné použít lepidlo, kterým lze vytvořit tenkou rovnoměrnou vrstvu bez bublinek. Dále také nesmí obsahovat látky, které by při zatížení vedly ke vzniku bublinek plynů. [9] [11]

## 2.3 Rozdělení odporových tenzometrů

Odporové tenzometry se dají rozdělit na dvě velké skupiny a to na kovové tenzometry a polovodičové tenzometry. Tyto skupiny se pak dají dále dělit podle různých kritérií.

### 2.3.1 Kovové tenzometry

Jedná se o tenzometry, jejichž mřížka je vyrobena z kovu. Nejčastěji, jak už bylo zmíněno, se jedná o kov zvaný konstantan, což je slitina mědi a niklu. Jiné používané kovy jsou například platina, wolfram, nikl, nichrom nebo manganin. Z pohledu typu mřížky se dá tato skupina dále rozdělit na drátkové, fóliové a vrstevové. Jiné dělení je pak podle konstrukce a to na lepené a příložené. [9] [10]

#### Drátkové tenzometry [9] [11]:

Jsou vyrobeny z kovového drátu, který je stočen do tvaru mnohonásobné vlásenky. Konce jsou poté napojeny na silnější vývody. Z pohledu historie se jedná o nejstarší typy tenzometrů a v dnešní době už nejsou tak často používány. Využívají se spíše jen pro některé speciální případy, například pro měření za vysokých teplot, nebo při měření velkých deformací.

Běžné drátkové tenzometry, lze dále rozdělit na snímače s lepenou podložkou, bez podložky a tenzometry příložené (nelepené). Tenzometry s lepenou podložkou jsou tvořeny kovovou mřížkou, která je přilepena na podložku z plastu, kovu nebo papíru. Speciální typy těchto snímačů, pak lze použít i při vysokých teplotách nebo při dlouhodobém vysokém zatížení,

popřípadě slouží jako samokompenzační tenzometry. Tenzometry lepené bez podložky se používají při extrémních teplotách, kdy jsou lepeny keramickým tmelem. Příložné drátkové tenzometry jsou tvořeny pouze aktivním odporovým článkem, u kterého nevznikají problémy s přenosem přetvoření na celý povrch článku. Bohužel jejich výroba je velmi nákladná a složitá, a proto se příliš nepoužívají.

Přednosti drátkových tenzometrů jsou malé rozptyly odporů, k-faktorů a teplotních součinitelů. Dále je velmi příznivá cena a dostatečný sortiment vhodných lepidel. Bohužel jsou omezovány rozměry mřížek a drátků, tím pádem i hodnotou výsledného odporu. Také pro ně platí poměrně nízké hodnoty k-faktoru a vysoká náchylnost na creep.

#### **Fóliové tenzometry [9] [11]:**

Jsou v dnešní době nejpoužívanější. Tvoří je tenká fólie o tloušťce řádově v jednotkách mikrometrů, která je přilepena na podložku lepidlem. Měřicí mřížka je nejčastěji vytvářena leptáním a podložka bývá z polyamidu nebo z fenolových filmů, které jsou zpevněny skelnými vlákny. Výrobní postup je na tak vysoké úrovni, že lze vyrobit tenzometr téměř libovolných tvarů a rozměrů.

Ve srovnání s drátkovými tenzometry vykazují fóliové lepší převody deformace z měřené součásti na fólii a také lepší přenos tepla. Jejich předností je možnost použití vyšších napájecích napětí, velmi dobrá připevnitelnost, vysoká mechanická odolnost a dlouhá životnost. Na druhou stranu běžné typy nelze použít při extrémních teplotách a při malých rozměrech mají tendenci ke creepu a hysterezi.

#### **Vrstvové [9]:**

Vrstvové tenzometry se používají téměř výhradně pro speciální aplikace a to především pro konstrukci senzorů tlaku.

### **2.3.2 Polovodičové tenzometry**

Jejich princip spočívá na jevu zvaném piezorezistence, který se vyskytuje u některých polovodičových materiálů, jako je například křemík nebo germanium. V podstatě se jedná o to, že se výrazně mění jejich elektrický odpor v závislosti na zatížení. Samotné tenzometry jsou pak tvořeny pásy z monokrystalů, které byly obohaceny difúzí o jiné materiály. Takovéto tenzometry jsou pak tuhé a tvrdé. [9]

Většina těchto tenzometrů je v porovnání s kovovými odporovými tenzometry lepší v odolnosti proti dynamickému namáhání a vykazují vyšší stabilitu. To znamená, že jsou méně náchylné na hysterezi a creep (tečení). Vyznačují se také vyšším součinitelem citlivosti, a tedy dosahují vyšších přesností a citlivostí. [9] [10]

### **2.4 Druhy odporových tenzometrů**

Výběr správného tenzometru se musí řídit několika kritérii a to z toho důvodu, že existuje velké množství různých tenzometrů s rozdílnými vlastnostmi. Pro volbu nejvhodnějšího snímače se tedy musí brát ohled, jak na měřenou součást, tak na problém, který chceme zkoumat. Obvykle se při výběru posuzuje použití tenzometru pro řešený problém, použitelnost z pohledu teploty a vlhkosti, přesnost, jmenovitý odpor tenzometru, počet měřících mřížek, tvar měřicí mřížky, maximální měřené přetvoření a další kritéria. Z toho vyplývá, že existuje velké množství aplikací těchto snímačů, jako například snímače pro měření jednoosé napjatosti nebo rovinné napjatosti, tenzometry měřící velké prodloužení,

tenzometry pro měření za extrémních teplot a nepříznivých okolních podmínek, snímače k měření vlastní napjatosti nebo únavové životnosti. [9] [11]

Pro tuto diplomovou práci jsou zásadní tenzometry pro měření rovinné napjatosti, a proto jim bude věnována následující podkapitola, kde bude hlavní část zaměřena na tenzometrické kříže a růžice.

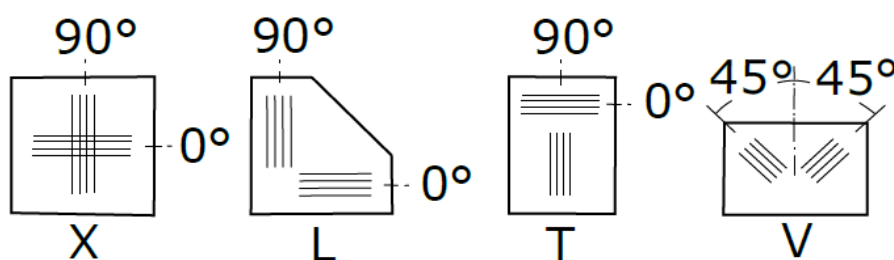
### 2.4.1 Rovinná napjatost

V experimentální analýze napětí je jednoosá napjatost velmi výjimečná. Mnohem častější je pak rovinná neboli dvouosá napjatost, která nastává, když jsou nenulové složky napětí rovnoběžné s jednou rovinou. Tato rovina je označována jako rovina napjatosti. Složky napětí ve směru kolmém na tuto rovinu jsou nulové. Dvouosá napjatost je tedy popisována dvěma nenulovými napětími. Tyto napětí jsou obvykle označovány jako hlavní napětí a jsou vzájemně kolmé. Hlavní napětí leží v hlavních rovinách, v nichž je smykové napětí rovno nule. Pro jednoznačné definování rovinné napjatosti tedy stačí znát hlavní napětí a jejich směry působení. [2] [9]

Z pohledu tenzometrie se rovinná napjatost vyšetřuje nejčastěji pomocí tenzometrických křížů nebo tenzometrických růžic a to z toho důvodu, že je nutné měřit deformaci ve více směrech. V obou případech se jedná o vícenásobné tenzometry, které jsou složeny z více měřících mřížek umístěných na společné podložce. [12]

#### Tenzometrické kříže

Jak už bylo zmíněno, jedná se o vícenásobné tenzometry, kdy dvě nezávislé měřící mřížky jsou umístěny pod vzájemným úhlem  $90^\circ$ . Existuje několik typů, přičemž nejznámější jsou typy X, L, T a V, jejichž název odkazuje na tvar křížení vinutí. Tyto typy jsou znázorněny na Obr. 2.2. [9]



Obr. 2.2: Tenzometrické kříže (upraveno dle [9])

Používají se pro případy, kdy známe směry hlavních napětí, přičemž do těchto směru pak umístíme i samotné měřící mřížky. Typické aplikace tenzometrických křížů jsou například vyšetřování hlavních napětí na povrchu rotačně symetrických nádob namáhaných vnitřním přetlakem nebo na hřídeli namáhané krutem. [12]

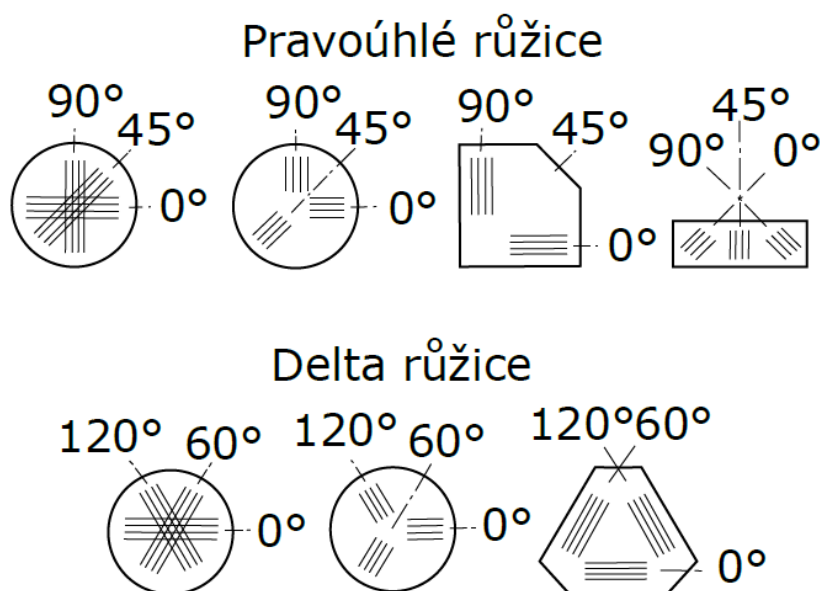
Vyhodnocení měřených deformací, poté vychází z výpočtu pomocí rozšířeného Hookova zákona pro rovinou napjatost. Z naměřených poměrných deformací  $\varepsilon_I$  a  $\varepsilon_{II}$ , ve dvou hlavních směrech, lze pomocí vztahů 2.12 a 2.13 stanovit hlavní napětí  $\sigma_I$  a  $\sigma_{II}$ . V těchto vztazích vystupují také dvě materiálové konstanty a to modul pružnosti v tahu  $E$  a Poissonovo číslo  $\mu$ . Hlavní napětí  $\sigma_{III}$  je už z definice pro rovinou napjatost logicky nulové. [9] [12]

$$\sigma_I = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_I + \mu \cdot \varepsilon_{II}) \quad 2.12$$

$$\sigma_{II} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_{II} + \mu \cdot \varepsilon_I) \quad 2.13$$

### Tenzometrické růžice

Tenzometrické růžice jsou snímače tvořené třemi měřícími mřížky na společné podložce. Slouží k vyšetřování dvouosé napjatosti pro případy, kdy neznáme směry hlavních napětí. Tenzometrické růžice se dělí na dva typy a to podle druhu provedení. Prvním typem jsou pravoúhlé růžice, u kterých jsou úhly natočení jednotlivých základů  $0^\circ$ -  $45^\circ$ -  $90^\circ$ . Tento typ se používá v případech, kdy lze určit alespoň přibližné směry hlavních napětí. V případě, že nelze odhadnout tyto směry, se používají delta růžice, jejichž uhlové natočení základů odpovídá  $0^\circ$  -  $60^\circ$  -  $120^\circ$ . Stejně jako u křížů lze dále oba typy dělit podle polohy měřících mřížek. [11] [12]



Obr. 2.3: Tenzometrické růžice (upraveno dle [9])

Vyhodnocení velikosti napětí se provádí podle vztahů 3.14 a 3.16, které se liší podle použitého typu růžice. Vystupují zde přetvoření  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$  a  $\varepsilon_c$  jednotlivých měřících mřížek. Pomocí nich, ale lze stanovit pouze velikost a nikoliv směr hlavního napětí. [12]

### Pravoúhlé růžice ( $0^\circ$ - $45^\circ$ - $90^\circ$ ) [11]:

$$\sigma_{I,II} = \frac{E}{1 - \mu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2} \cdot (1 + \mu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad 2.14$$

$$\tan \psi_p = \frac{2 \cdot \varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad 2.15$$

**Delta růžice (0° - 60° - 120°) [11]:**

$$\sigma_{I,II} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{1+\mu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3} \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \quad 2.16$$

$$\tan \psi_d = \frac{\sqrt{3} \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2 \cdot \varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \quad 2.17$$

Pro určení směru je nejdříve nutné vypočítat pomocný úhel  $\psi$  podle vztahů 3.15 a 3.17, který společně se znalostí kvadrantu, ve kterém hlavní přetvoření  $\sigma_I$  leží, stanoví hodnotu úhlu odklonu směru hlavního napětí  $\sigma_I$  od směru měřící mřížky růžice A (směr přetvoření  $\varepsilon_a$ ) ve směru proti otáčení hodinových ručiček. [11]

## 2.5 Instalace tenzometrů

Na správném připevnění tenzometrů velmi závisí samotná přesnost měření. U měření nestačí pouze vybrat vhodné zařízení, ale musí se také najít vhodné místo k umístění a samozřejmě se musí i dodržovat postup korektní instalace těchto snímačů. Správné přidělení tenzometru zajistí jeho pevné spojení s povrchem měřené součásti tak, aby bylo dosaženo přenosu přetvoření z povrchu součásti na snímač, s co nejmenšími ztrátami. [9] [10]

K upevňování těchto měřících zařízení se využívá několika technologií. Nejrozšířenější technologií je lepení, které se používá téměř u všech běžných měření. Dalšími metodami, které se, ale využívají spíše pro speciální případy, jsou difúzní metody (naprašování a napařování) a přivařování. Dříve se také používalo mechanické připevnění, ale dnes už se s tím, lze setkat jen v opravdu výjimečných případech. [9]

### 2.5.1 Lepení

Pro nejběžnější metodu přidělování tenzometrů je klíčové zvolit vhodné lepidlo, proto je dobré volit lepidla doporučená výrobcem. Jiné druhy lepidel by mohly vést k nežádoucí reakci lepidla a materiálu tenzometru nebo měřené součásti. Existuje velké množství různých lepidel s určitými vlastnostmi a o to je volba důležitější.

Například jsou lepidla rozdělována podle teploty, za které dochází k vytvrzení. Lepidla vytvrditelná za zvýšené teploty vykazují velmi dobré mechanické vlastnosti, ale doba vytvrzení je poměrně vysoká, proto se pro méně náročná použití používají lepidla vytvrditelná za pokojové teploty. [9]

Před samotným lepením se musí povrch pod snímačem očistit. Nejdříve se provede mechanické očištění, čímž se odstraní hrubé nečistoty a zarovná se povrch od nerovností. Poté se použijí speciální látky k chemickému očištění povrchu, což především znamená odmaštění. Po zkontrolování toho, že lze tenzometr vhodně přiložit, přichází na řadu samotné lepení, kdy je doporučeno se striktně držet pokynů výrobce. Speciální lepidlo je nanášeno na tenzometr a přes acetátovou nebo teflonovou fólii se krouživými pohyby vytlačí přebytečné lepidlo. Následně je nutné počkat do vytvrzení lepidla, po kterém se opatrně odstraní fólie. [9] [11]

Mimo samotný tenzometr se ještě přilepuje svorkovnice, k níž se přilepují tenzometrické přívody. Z důvodu ochrany před vlhkostí a mechanickými nebo chemickými vlivy z okolí se snímače překrývají vrstvou ochranného tmelu, laku nebo vosku. [9]

### **2.5.2 Difúzní metoda**

Základem této metody je tvorba tenkých vodivých vrstev přímo na měřené součásti využitím napařování nebo vakuového napařování. Tyto vrstvičky se poté překryjí fotocitlivou vrstvou, na které je vytvořen samotný tvar snímače. Tímto způsobem lze vytvořit mřížku jakéhokoliv tvaru. Vedle velmi dobrého přenosu deformace z povrchu na tenzometr se takto připevněné tenzometry vyznačují velmi dobrou dlouhodobou stabilitou. Materiálem nanášených vrstviček je obvykle zlato, hliník, tantal nebo chromnikl. [13]

### **2.5.3 Přivařování**

Přivařovat lze pouze tenzometry s kovovou podložkou a to jen k ocelovým nebo litinovým povrchům. Jedná se v podstatě o bodové svařování snímače a součásti. Největší výhody této metody spočívají v rychlosti a nenáročnosti připevnění. Jejich využití je možné také za vysokých teplot, kdy by lepení nebylo již možné. [13]

### 3 MĚŘENÍ TLAKU

Tlak se měří velmi často a to napříč mnoha technickými odvětvími. Využití snímačů tlaku je velmi široké a to ať už za účelem měření tlaku kapalin v různých pracovních systémech a nádobách nebo měření tlaku potřebného při řízení a regulaci tlakových zařízení. Samozřejmě, kromě těchto nejčastějších použití, je mnoho dalších aplikací a to ať už v praxi nebo v experimentálních odvětvích.

V této kapitole jsou jenom v krátkosti shrnuty druhy tlakoměrů a jejich použití. Z důvodu, že měření tlaků pomocí běžných tlakoměrů není hlavní téma této práce, tak jsou v této kapitole pouze stručně popsány informace o měření tlaku těmito snímači. Na závěr je pak zmíněna instalace těchto snímačů a to z toho důvodu, že se jedná v porovnání s instalací tenzometrů o jeden z hlavních důvodů, proč se má smysl zabývat problematikou, která je hlavním tématem této práce.

#### 3.1 Tlak

Tlak je jednou ze základních fyzikálních veličin a jedná se o důležitou stavovou veličinu. Tlak se definuje poměrem elementu síly  $dF$ , která působí ve směru normály kolmo na element plochy  $dS$ .

$$p = \frac{dF}{dS} \quad 3.1$$

U tuhých látek se uvádí tzv. měrný tlak a to z toho důvodu, že se vyjadřuje pouze střední hodnota tlaku, protože stykové plochy nejsou nikdy dokonale hladké. Lze tedy přepsat vzorec 3.1 do tvaru 3.2. [14]

$$p = \frac{F}{S} \quad 3.2$$

U kapalin se často tlak vyjadřuje hydrostatickým tlakem sloupce vody, pro který platí vzorec 3.3, kde vystupuje výška vodního sloupce  $h$ , hustota kapaliny  $\rho_k$  a tíhové zrychlení  $g$ .

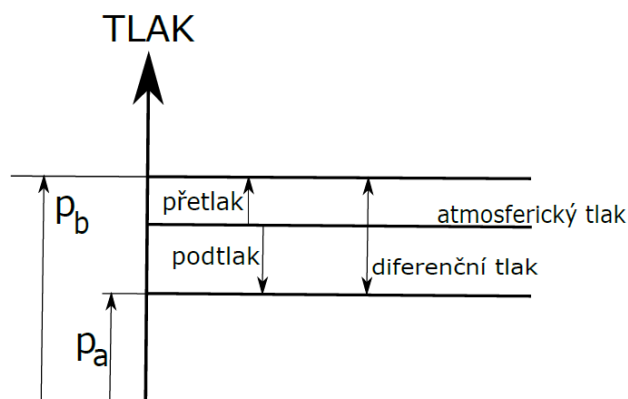
$$p = h \cdot \rho_k \cdot g \quad 3.3$$

V případě, že se kapalina pohybuje, tak v ní působí kromě statického tlaku  $p_s$  i tlak dynamický  $p_D$ . Jejich součet je pak uváděn jako celkový tlak kapaliny.

Jednotkou tlaku je pascal, který se označuje  $Pa$ . Ze vztahu 3.2 je patrné, že jeden pascal odpovídá tlaku  $p$ , který vyvolá síla  $F$  o velikosti jednoho newtonu, která je rovnoměrně rozložena na ploše  $S$  o velikosti jednoho čtverečního metru, kolmo na tuto plochu.

Tlak se rozděluje podle toho, k jakému vztažnému bodu ho vyjadřujeme, a proto se musí obvykle zdůraznit, jestli se jedná o tlak absolutní, přetlak, podtlak nebo tlak diferenční.





Obr. 3.1: Tlak

### 3.2 Druhy tlakoměrů

Snímače tlaku lze dělit podle několika kritérií a v této podkapitole jsou uvedeny dělení podle některých z těchto znaků.

#### 3.2.1 Dělení podle velikosti a typu měřeného tlaku [14]

- Snímače vakua
- Snímače přetlaku
- Snímače podtlaku
- Diferenční snímače (měření tlakových rozdílů)
- Snímače pro měření tlaku ovzduší

#### 3.2.2 Dělení podle stupně přesnosti [14]

- Provozní
- Kontrolní
- Laboratorní

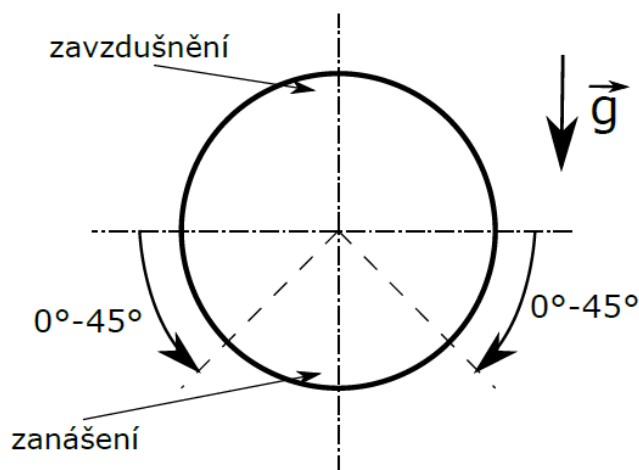
#### 3.2.3 Dělení podle fyzikálního principu měření [14] [15]

- Tlakoměry pístové
- Tlakoměry zvonové
- Tlakoměry kapalinové – princip je založený na měření výšky sloupce kapaliny v přístroji
- Tlakoměry elektrické – princip založený na měření některé elektrické veličiny, která je závislá na tlaku (nejčastěji změna elektrického odporu)
- Tlakoměry deformační
  - nejrozšířenější snímače
  - měří se deformace pružného prvku (trubice, membrány, ...)
  - jednoduché a spolehlivé snímače s poměrně nízkou cenou
  - dělení podle způsobu snímání deformace: piezoresistivní, indukční, tenzometrické, kapacitní, ...

### 3.3 Instalace tlakoměrů

Jak již bylo zmíněno u tenzometrů, tak i u tlakoměrů je nutné řídit se určitými pokyny a zvolit vhodné místo tlakového odběru. Je snaha umístit tlakoměry, co nejblíže k měřené nádobě (např. potrubí), ale tak aby nedocházelo k teplotnímu ovlivnění snímače teplotou potrubí. Dále je potřeba řídit se doporučenými vzdálenostmi od rušivých prvků (ventily, klapky, kolena, ...), tyto vzdálenosti jsou obvykle v rozmezí 5 D až 15 D (D zde vystupuje jako průměr potrubí). [10] [14]

Místo tlakového odběru musí být hladké s ostrými hranami, tedy nesmí zasahovat dovnitř potrubí. Je nutné zohlednit možnost zanášení potrubí nečistotami a možnost zavzdušnění, a proto se pro měření tlaku v kapalině připravují odběrová místa v bocích potrubí. Na obrázku je znázorněna oblast nejčastějšího umísťování odběrových míst při měření tlaku kapaliny v potrubí. [16]



Obr. 3.2: Poloha tlakových odběrů v potrubí [16]

Velmi často se v praxi vyskytuje umístění ventilu mezi snímač a potrubí, čímž nejenže je možné odpustit nežádoucí látky, vyskytující se v potrubí, ale slouží i k uzavření přívodu měřeného média ke snímači.

Kromě těchto několika základních podmínek je důležité řídit se při různých aplikacích i jinými předpoklady charakteristickými pro toto určité použití. Například pro měření tlaku plynu se snímače umísťují nad potrubí nebo při měření agresivního média je nutné použít ochranu proti korozi a podobně. [10] [15]

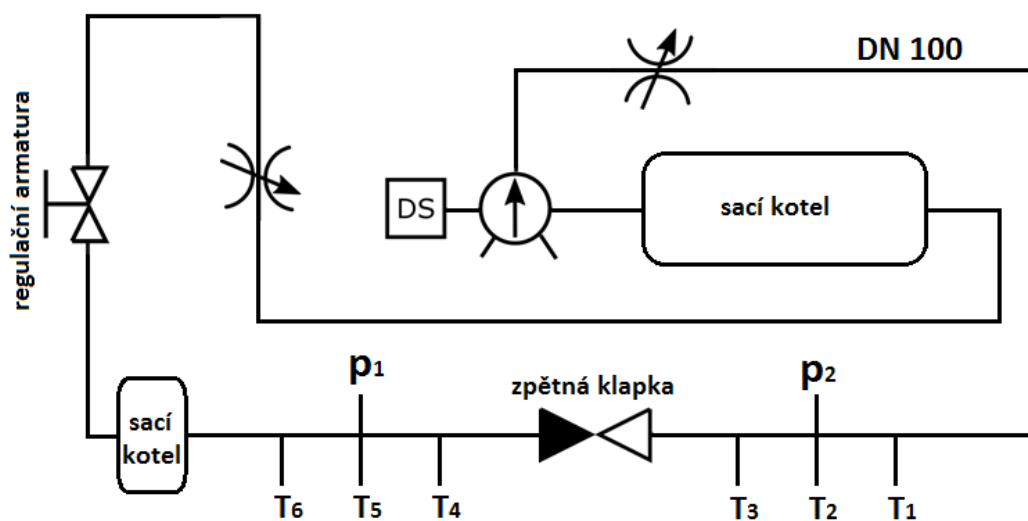
## 4 EXPERIMENT

Ačkoliv je teoretický popis každé problematiky velmi důležitý, tak se často neobejdeme bez experimentálního výzkumu. Tyto experimenty poskytnou nejen důležitou kontrolu teoretických matematických závěrů, ale díky provedeným měřením se dá dále matematický model opravit a popřípadě i upravit s možností zdokonalení samotné vyhodnocovací metody.

V této kapitole je popsána zkušební trať a měřicí postupy, které byly použity při měření.

### 4.1 Měřicí trať

Pro tenzometrické měření tlaku v potrubí byla využita měřicí trať v hydraulické laboratoři odboru Fluidního inženýrství VUT. Schéma tratě je znázorněno na *Obr. 4.1*. Měřicí trať byla původně navržena pro měření chování zpětné armatury, ale pro potřeby tohoto experimentu byla doplněna o šest nalepovacích tenzometrických snímačů a o dva tenzometrické tlakoměry. Kromě těchto přidanych snímačů se trať skládala ze dvou sacích nádrží, které sloužily jako zásobníky kapaliny, sacího potrubí DN125, čerpadla BETA 26, výtlačného potrubí DN100, indukčních průtokoměrů, zpětné klapky MSA C23 a regulační armatury, která se nacházela mezi dvěma zásobníky vody. K pohonu čerpadla sloužil stejnosměrný dynamometr.



Obr. 4.1: Schéma měřicí tratě

Jednalo se o vícenásobné tenzometry s uspořádáním měřících mřížek do kříže a byly umístěny na povrchu výtlačného potrubí a to tak, že první tři snímače se nacházely před zpětnou klapkou a zbylé tři snímače za zpětnou klapkou. Použité tlakoměry byly umístěny do bezprostřední blízkosti druhého a pátého tenzometru. Přesné umístění tlakoměru jedna a tenzometru pět je patrné na *Obr. 4.2*. Instalace šestice tenzometrů byla provedena 17. srpna 2016.



Obr. 4.2: Umístění tenzometru 5 a tlakoměru 1

Výstupem experimentu z 15. 11. 2016 byla série naměřených dat. Přesněji se jednalo o data z šesti tenzometrických křížů a dvou tlakoměru, jejichž vzorkovací frekvence byla 3,2 kHz. Průtokoměry zde byly umístěny pouze pro vyhodnocování charakteristiky armatury a pro tento tenzometrický experiment nenašly uplatnění.

Kromě hlavního měření, kdy se pomocí ovládání dynamometru opakovaně dosahovalo uzavírání zpětné klapky (čímž docházelo ke změně tlaku v potrubí). Byly také změřeny dva stavy, které byly pracovní nazvány jako *atmosféra* a *statika*. *Statika* byl stav, kdy bylo čerpadlo vypnuto a zpětná klapka uzavřena, při tomto stavu bylo potrubí vnitřně zatěžováno pouze hydrostatickým tlakem bez jakéhokoliv hydrodynamického přírůstku. Tedy jinak řečeno, kapalina byla v klidu. *Atmosféra* byl poté stav, kdy byl vnitřní i vnější tlak atmosférický a potrubí tedy nebylo zaplaveno vodou. Oba tyto body se měřily stejný den jako hlavní měření. *Statika* se zaznamenávala bezprostředně po hlavním měření a *atmosféra* byla proměřena v následující půlhodině.

## 4.2 Měřicí technika

V předchozí podkapitole již bylo uvedeno, že bylo použito šest snímačů deformace a dva tlakoměry. To znamená, že byly měřeny následující veličiny:

Tab. 4.1: Měřené veličiny

Označení	Název	Jednotka
$\epsilon_{a\_1-6}$	délkové přetvoření v osovém (meridiánovém) směru tenzometrů 1 až 6	$\mu\text{m/m}$
$\epsilon_{b\_1-6}$	délkové přetvoření v obvodovém (tečném) směru tenzometrů 1 až 6	$\mu\text{m/m}$
$p_1$	tlak za zpětnou klapkou	$\mu\text{m/m}$
$p_2$	tlak před zpětnou klapkou	$\mu\text{m/m}$

**Měřicí ústředna EMS DV803 [17]**

- měřicí ústředna pro rozsáhlé dynamické i statické měření v průmyslovém prostředí
- možnost měření až 32 kanálů, přičemž každý kanál obsahuje vlastní předzesilovač a samostatný šestnáctibitový A/D převodník se vzorkovací frekvencí až 3200 Hz
- měřená čidla: tenzometry, termočlánky, odporové teploměry, akcelerometry, napět'ové a proudové vstupy, uživatelsky definovaná čidla
- všechny kanály jsou měřeny synchronně
- obsahuje řídicí šestnáctinásobný procesor (Motorola), signálový procesor (Analog Devices) a datovou paměť typu Compact Flash
- s PC komunikuje pomocí ethernetového rozhraní
- výrobce: Ing. Miroslav Pohl

**Tenzometrické pravoúhlé růžice HBM – 1 XY-6-120 (6 kusů) [18]**

- odpor:  $120\ \Omega \pm 0,35\ \%$
- k-faktor:  $2,06 \pm 1\ \%$
- příčná citlivost:  $0,6\ \%$

**Tlakové snímače HBM P3ICP [19]**

- 1 - P3ICP/10BAR (1 MPa) a 1 - P3ICP/50BAR (5 MPa)

Na měření se podíleli: Ing. Pavel Dokoupil, Ing. Martin Hudec a doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

## 5 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Následující kapitola se zabývá zpracováním a vyhodnocením experimentu s cílem stanovit tlak v potrubí z měřených deformací povrchu potrubí. Pro vyhodnocování byly použity tři metody, které jsou zde podrobně popsány. První dvě metody vychází ze znalosti geometrie měřeného potrubí a základních zákonů mechaniky těles. Tyto metody jsou dále podrobeny jednoduché citlivostní analýze, která stanovuje vliv jednotlivých parametrů matematických modelů na výsledek. Třetí metoda vychází z kalibrace matematického modelu pomocí dvou bodů, v kterých známe délkové přetvoření i tlak.

### 5.1 Příprava dat

Měřená data byla poskytnuta ve formě textových dokumentů s příponou txt. Označení těchto dokumentů bylo ve formátu D161115\_100, kde prvních šest čísel po písmenu D značí rok, měsíc a den, kdy bylo měření provedeno a poslední tři čísla jsou volitelná, za účelem rozlišení jednotlivých měření ze stejného dne.

Z důvodu, pozdějšího porovnání vyhodnocených tlaků z deformace s měřenými tlaky pomocí tlakoměrů, se přistoupilo pouze k vyhodnocení dat z tenzometrických křížů, nesoucích číselné označení 2 a 5. Jedná se o tyto dva tenzometrické snímače z důvodu, že v obdobných místech byly umístěny tlakoměry. Je tedy uvažováno, že data z tenzometru 2 odpovídají tlakům z tlakoměru 2 a tenzometr 5 je porovnáván s daty z tlakoměru 1.

Další úpravou naměřených dat bylo převzorkování. Po doporučení vedoucího práce se přistoupilo k redukci dat 1:100, to znamená, že ze vzorkovací frekvence 3,2 kHz se přešlo na vzorkování 32 Hz.

Protože použité snímače deformace i tlaků jsou založeny na funkci tenzometrů, tak se musí provést vynulování jednotlivých signálů. To se provádí tak, že se stanoví hodnota signálu měřeného při stavu nula a od ní se poté odečtou, popřípadě přičtou jednotlivé signály snímačů a to podle orientace znamének.

Jako nulový stav pro signál z tenzometrických růžic byl zvolen stav pracovní nazvaný jako *statika*, který byl již zmíněn v kapitole 4 *Experiment*. Pro jeden krok následujícího vyhodnocování byl tento nulový stav nahrazen stavem, který byl krátkodobě dosahován v průběhu hlavního měření, kdy se klapka uzavřela, čerpadlo odpojilo a kapalina se převážně uvedla do klidu. Samotné vynulování se provedlo tak, že se stanovily hodnoty nulového stavu pro jednotlivé přetvoření, které se odečetly od hlavního měřeného signálu.

Vynulování signálů z tlakoměrů bylo provedeno obdobně jako u signálů přetvoření. Opět se jako nulový stav použila statika, čímž byl převeden měřený signál tlaku na hydrodynamický tlak, což je pro porovnání vyhodnocovaných a měřených tlaků důležité. Kdyby nebylo tárování provedeno na stejný stav, tak by jejich porovnání nebylo možné. Díky tomu, že použité tlakoměry zaznamenávají celkový tlak a byl změřen stav označený jako atmosféra, který byl již zmíněn v předchozí kapitole, tak lze stanovit hydrostatický tlak v potrubí. To lze provést opět vynulováním signálu. Tentokrát je, ale nutné vynulovat signál tlaku z měřené *statiky*, nikoliv z hlavního měření, na nulový bod označený jako *atmosféra*.

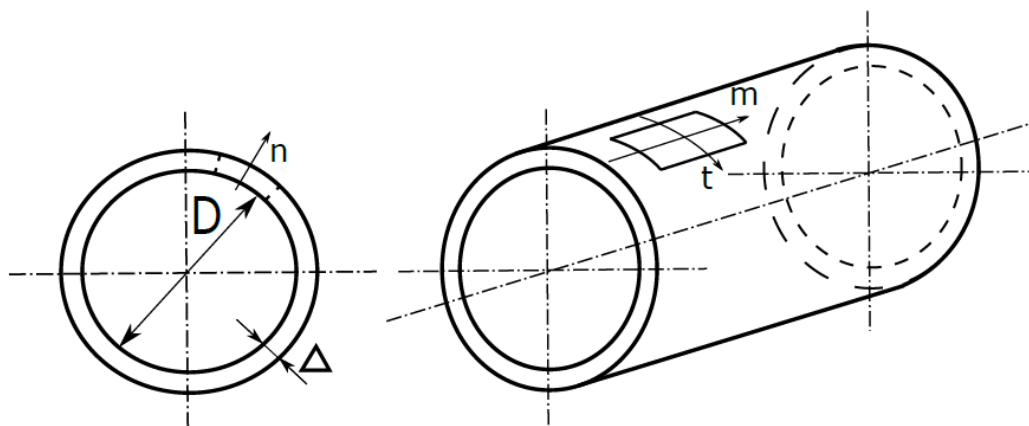
Posledním bodem přípravy bylo převedení vynulovaného signálu z tlakoměru na standardní jednotky. Jak již bylo zmíněno, tak byly použity tenzometrické tlakoměry a výstup z těchto snímačů je v podobě zaznamenávané deformace. Oba tlakoměry měly jako výstupní jednotku  $\mu\text{m/m}$ . Pro převedení signálu na signál s běžně používanými jednotkami je ho potřeba upravit specifickými koeficienty. Pro uvedené tlakoměry platí vztahy 5.1 a 5.2.

$$\frac{p_1[\mu m/m]}{1000,1} = p_1[MPa] \quad 5.1$$

$$\frac{p_2[\mu m/m]}{198,8} = p_2[MPa] \quad 5.2$$

## 5.2 Tenkostěnný model

Pro vyhodnocení měřené deformace byl navržen matematický model vycházející ze znalosti geometrie potrubí a membránové teorie skořepin, která byla zmíněna v kapitole 1 *Mechanika těles*. Zjednodušená geometrie potrubí je popsána na Obr. 5.1, na kterém jsou také vyznačeny hlavní směry napětí ( $m$  – meridiánový neboli osový směr;  $t$  – obvodový neboli tečný směr;  $n$  – normálový neboli radiální směr). Vnitřní průměr potrubí  $D$  a hodnota tloušťky stěny  $\Delta$  jsou společně s materiálovými konstantami zaznamenány v Tab. 5.1.



Obr. 5.1: Uvažovaná geometrie

Tab. 5.1: Rozměry potrubí a materiálové konstanty

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
Vnitřní průměr	D	100	mm
Vnitřní poloměr	R	50	mm
Tloušťka stěny	$\Delta$	4	mm
Poissonovo číslo	$\mu$	0,3	-
Modul pružnosti v tahu	E	210	GPa

Prvním krokem bylo stanovit z měřené deformace, v tomto případě z měřeného podélného přetvoření, povrchové napětí. Bylo možné měřit přetvoření ve dvou hlavních směrech pomocí tenzometrických křížů, protože u potrubí zatěžovaného vnitřním přetlakem jsou známy hlavní směry napětí. Tyto směry jsou vyznačeny na předchozím obrázku (Obr. 5.1), přičemž přetvoření bylo snímáno ve směrech  $m$  a  $t$ . Z důvodu, že byly použity tenzometrické kříže, lze aplikovat vztahy 5.3 a 5.5, které jsou pouze upravené rovnice 2.12 a 2.13 z kapitoly 2 *Tenzometrie*. Pro lepší ilustraci vyhodnocování budou následující vztahy doplněny i o samotnou ukázkou výpočtu, pro kterou byly náhodně zvoleny data z tenzometru 2 v jednom

časovém úseku. Tyto data lze dohledat v *Tab. 5.2*, ale nejedná se přímo o měřené hodnoty, ale o hodnoty, které již prošly přípravou k výpočtu (vynulování, přepočítání pomocí kalibračních konstant, atd.).

Tab. 5.2: Ukázková data

$\varepsilon_t (\varepsilon_b)$	$\varepsilon_m (\varepsilon_a)$	$p$
[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[MPa]
17,6	45,8	0,5416

$$\sigma_m = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_m + \mu \cdot \varepsilon_t) \quad 5.3$$

$$\sigma_m = \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{1 - 0,3^2} (45,8 \cdot 10^{-6} + 0,3 \cdot 17,6 \cdot 10^{-6}) = 11,788 \text{ MPa} \quad 5.4$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_t + \mu \cdot \varepsilon_m) \quad 5.5$$

$$\sigma_t = \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{1 - 0,3^2} (17,6 \cdot 10^{-6} + 0,3 \cdot 45,8 \cdot 10^{-6}) = 7,232 \text{ MPa} \quad 5.6$$

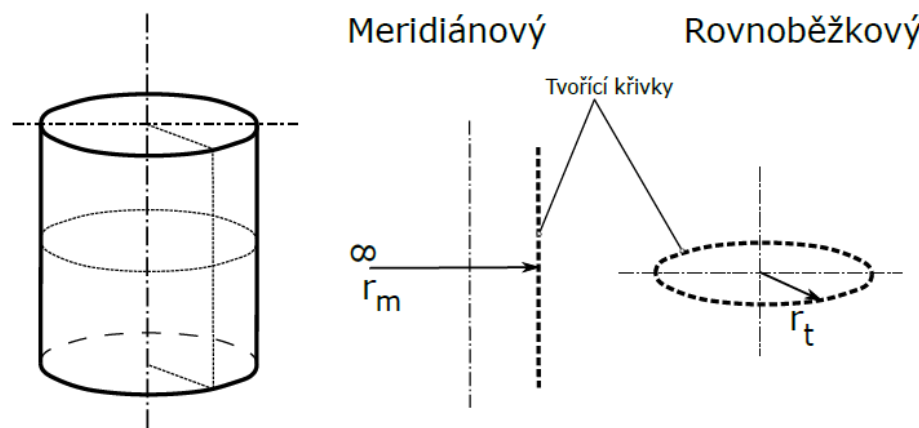
Dalším krokem je určit závislost mezi povrchovým napětím a vnitřním tlakem v potrubí. Hlavním předpokladem bylo, že se radiální napětí, které u těchto úloh bývá výrazně nižší než napětí obvodové a osově, zanedbá a zároveň se bude uvažovat napjatost po tloušťce stěny jako neměnná. Z těchto důvodů, lze považovat toto potrubí za rotačně symetrickou skořepinu, na kterou lze aplikovat membránovou teorii skořepin. Tato teorie předpokládá, že v řezech skořepiny nevznikají žádné momenty. To mimo jiné znamená, že nádoba musí být zatížena pouze vnitřním přetlakem a nikoliv vnějším. Dále se musí posoudit vliv tvarových změn a defektů nádoby, které zabraňují použití membránové (bezmomentové) teorie skořepin. V případě nesplnění těchto podmínek by bylo nutné přistoupit k složitější momentové teorii.

Problematika této bezmomentové teorie je podrobněji rozebrána v kapitole *I Mechanika těles*, kde je mimo jiné také odvozena Laplaceova rovnice ve tvaru 5.7. Mimo meridiánového a tečného napětí zde vystupuje tloušťka stěny, vnitřní přetlak a především tzv. poloměry křivosti  $r_m$  (meridiánový) a  $r_t$  (obvodový).

$$\frac{\sigma_m}{r_m} + \frac{\sigma_t}{r_t} = \frac{p_n}{\Delta} \quad 5.7$$

Poloměry křivosti lze stanovit z meridiánového a rovnoběžkového řezu, přičemž meridiánový řez prochází osou rotace a rovnoběžkový je na tuto osu kolmý. To je patrné na *Obr. 5.2*, který odpovídá řezům pro těleso válcového tvaru, to znamená i potrubí. Řezy odhalí tvar tvořící křivky v jednotlivých směrech a pak lze určit poloměry křivosti pro tyto směry.





Obr. 5.2: Stanovení poloměrů křivosti (upraveno dle [7])

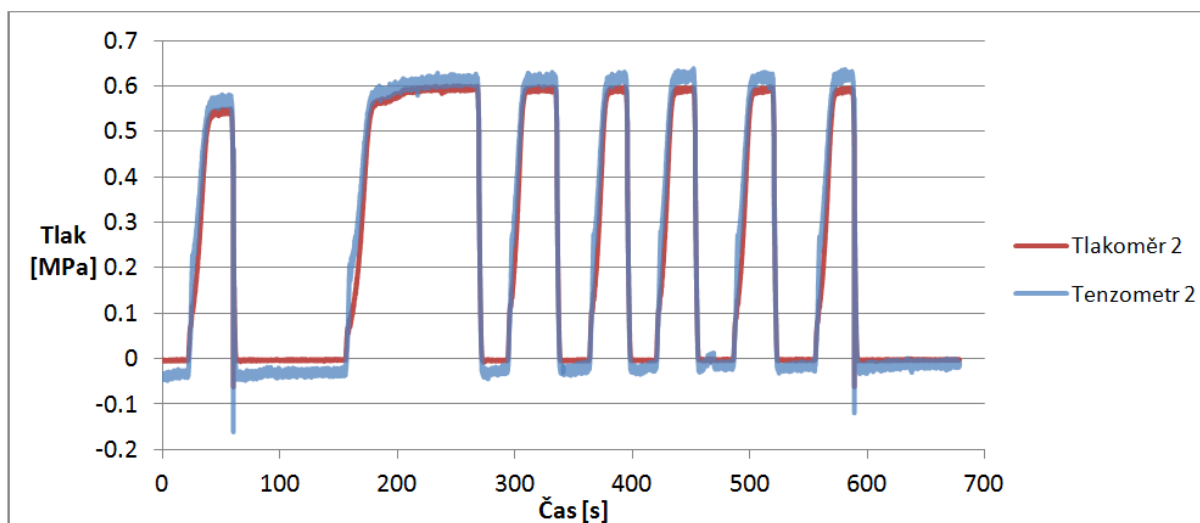
Pro další úpravy Laplaceovy rovnice byly určeny poloměry křivosti následovně. Po meridiánovém řezu je tvořící křivka přímka, která je rovnoběžná s osou rotace, což znamená, že poloměr křivosti je nekonečně velký. U rovnoběžkového řezu je pak tvořící přímka kružnice a poloměr křivosti odpovídá právě poloměru této kružnice. Laplaceovu rovnici lze tedy přepsat do formy 5.8, která mimo jiné udává hledanou závislost tlaku na obvodovém napětí.

$$p = \frac{\sigma_t \cdot \Delta}{r_t} \quad 5.8$$

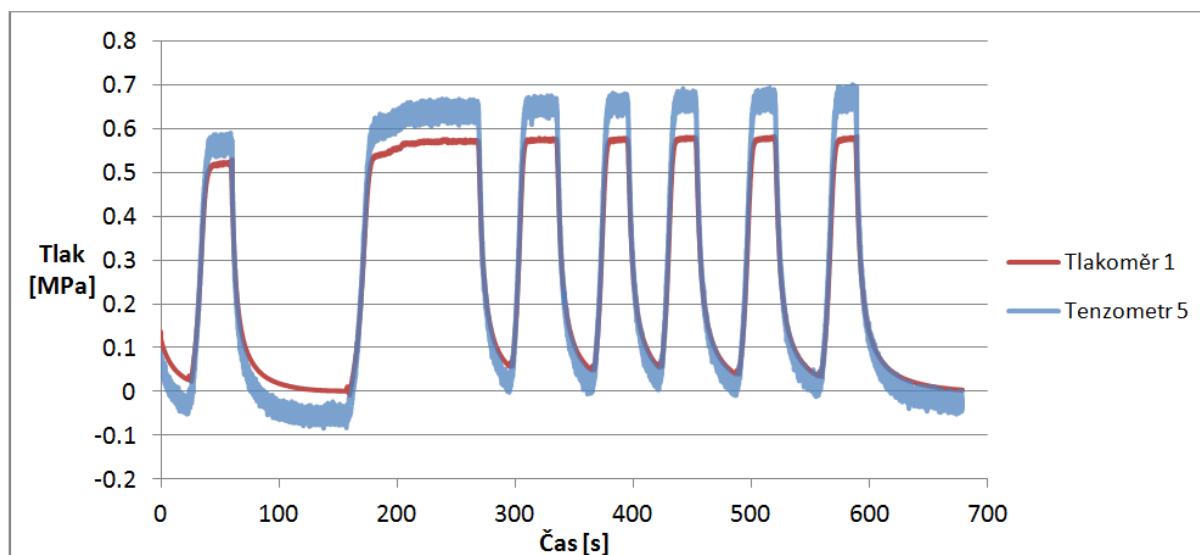
V případě, že by bylo možné stanovit pouze meridiánové napětí, tak by závislost tlaku na tomto napětí musela být odvozena z rovnice rovnováhy pro vhodně zvolený řez, ale pro uvedený experiment a většinu aplikací na reálných dílech nelze, z důvodu ukotvení potrubí, uvažovat vliv podpěr v meridiánovém směru za zanedbatelný. Je velmi složité stanovit tento vliv vazeb na napjatost v osovém směru a často téměř neproveditelné, proto byl upřednostněn výpočet z obvodového napětí podle vztahu 5.8. V rovnici 5.9 je opět pro lepší představu ukázán dosažený výpočet.

$$p = \frac{7,232 \cdot 10^6 \cdot 0,004}{0,05} = 0,579 \text{ MPa} \quad 5.9$$

Po aplikaci těchto vzorců na upravený měřený signál tenzometrů 2 a 5 byl stanoven průběh tlaků v potrubí v závislosti na čase. Z těchto dat byly vytvořeny *Graf 5.1* a *Graf 5.2*, které porovnávají tlaky dopočítané z měřených délkových přetvoření s tlaky měřenými pomocí běžných tlakoměrů. Jak už bylo zmíněno v podkapitole, zabývající se přípravou dat, tak se jedná výhradně o tlaky hydrodynamické.

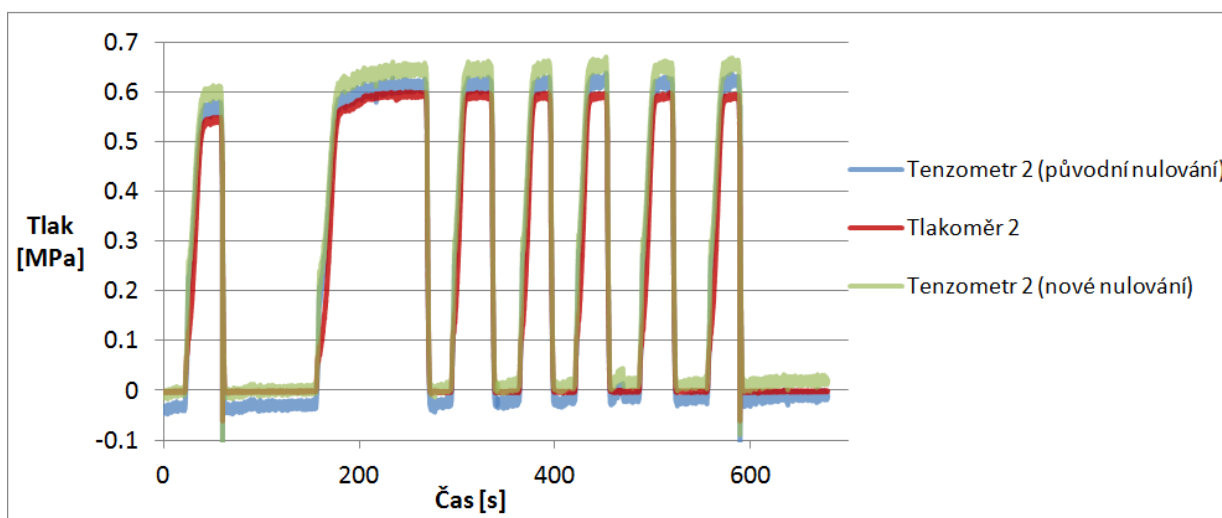


Graf 5.1: Vyhodnocení – tenzometr 2 (tenkostěnný)



Graf 5.2: Vyhodnocení – tenzometr 5 (tenkostěnný)

Vysvětlení záporných tlaků, počítaných z měřené deformace, spočívá v tom, že nulování signálu z tenzometrů se provedlo na stav, který byl měřený po vyhodnocovaném měření, a měřená přetvoření se pro nulový bod během zatěžování při tomto experimentu měnila. Docházelo u tenzometru k posuvu nuly. To znamená, že hodnoty přetvoření pro stejné zatížení se postupně měnila. Z grafů a dat je patrné, že zhruba během jedenácti minut došlo ke změně přetvoření, které vyvolalo na vyhodnocovaném tlaku změnu skoro 30 kPa u tenzometru 2 a 25 kPa u tenzometru 5. Tato změna může mít zdroj v celé řadě problémů, ale předpokládá se, že je především způsobena vlivem únavy, změny teploty nebo změny osového napětí (změnou vlivu vazeb potrubí). Porovnání výsledků, kdy se nulovalo na statiku, měřenou po samotném hlavním měření, nebo na statiku, která krátkodobě nastala po zavření klapky u tenzometru 2 zhruba po sté sekundě, je patrné na *Graf 5.3*.



Graf 5.3: Tenzometr 2 – rozdílné nulování

Na hodnotách tlaků z tlakoměru 2 a i tlaků vyhodnocených z přetvoření na tenzometru 2 jsou patrné dva výrazné výkyvy do záporných hodnot (zhruba v 60. sekundě a v 590. sekundě). To jsou výkyvy, které nemají výpovědní hodnotu, protože jsou způsobeny rázem v potrubí nebo jiným narušením měření.

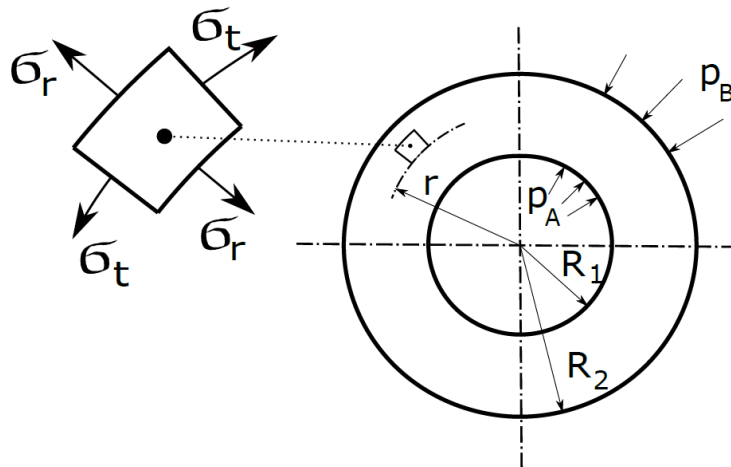
Porovnání přesnosti a důslednější rozebrání výsledku je provedeno v pozdějších kapitolách.

### 5.3 Silnostěnný model

U předchozího modelu se vycházelo z předpokladu, že zkoumané potrubí lze považovat za tenkostěnnou skořepinu. Běžně se v literatuře, která se zabývá mechanikou těles, uvádí jako kritérium tenkostěnnosti u válcových těles poměr tloušťky stěny a vnitřního průměru. Přičemž jako hraniční hodnota se obvykle bere jedna desetina, popřípadě osm setin. Z toho vyplývá, že tento řešený případ by ještě odpovídal tenkostěnnému tělesu (viz vztah 5.10).

$$k = \frac{\Delta}{R} = \frac{0,004}{0,05} = 0,08 < 0,1 \quad 5.10$$

Za účelem určení vlivu tloušťky stěny je nutné stanovit matematický model pro případ, kdy uvažujeme řešené potrubí za silnostěnné. Jedná se tedy o rotačně symetrické válcové těleso, které je zatíženo tlakem na vnitřní, popřípadě i vnější stěně nádoby. V tomto případě je nutné respektovat radiální napětí, které už nelze zanedbat, přičemž radiální i obvodové napětí lze definovat funkcí závislou na poloměru.



**Obr. 5.3:** Silnostěnné válcové těleso (upraveno dle [4])

Při odvození modelu se vyšlo ze základních rovnic pro radiální a obvodové napětí válcových těles. Jedná se o vztahy 5.11 a 5.12, kde neznámé  $C_1$  a  $C_2$  jsou integrační konstanty. [4]

$$\sigma_r = C_1 - \frac{C_2}{r^2} \quad 5.11$$

$$\sigma_t = C_1 + \frac{C_2}{r^2} \quad 5.12$$

$$\sigma_r(r = R_1) = -p_A \quad 5.13$$

$$\sigma_r(r = R_2) = -p_B \quad 5.14$$

Integrační konstanty  $C_1$  a  $C_2$  lze odvodit z okrajových podmínek 5.13 a 5.14.

$$C_1 - \frac{C_2}{R_1^2} = -p_A \quad 5.15$$

$$C_1 - \frac{C_2}{R_2^2} = -p_B \quad 5.16$$

$$p_A - p_B = C_1 - C_1 + \frac{C_2}{R_1^2} - \frac{C_2}{R_2^2} = \frac{C_2 \cdot (R_2^2 - R_1^2)}{R_1^2 \cdot R_2^2} \quad 5.17$$

$$C_2 = \frac{(p_A - p_B) \cdot R_2^2 \cdot R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad 5.18$$

$$C_1 = \frac{p_A \cdot R_1^2 - p_B \cdot R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad 5.19$$

Dalším krokem bylo potřeba stanovit závislost vnitřního tlaku na povrchovém napětí na vnější stěně nádoby. Obecný tvar funkce by šel jednoduše vyjádřit z rovnice 5.12, kam stačí dosadit odvozené integrační konstanty, vnější poloměr a hodnotu vnějšího povrchového napětí.

Pro řešený případ, lze, ale tuto závislost zjednodušit pomocí předpokladů 5.20 a 5.21. A z pohledu zadání a lepší transparentnosti výsledného vzorce byl vnější průměr  $R_2$  vyjádřen pomocí tloušťky stěny  $\Delta$  ve tvaru 5.22.

$$p_B = 0 \text{ Pa} \quad 5.20$$

$$\sigma_t(r = R_2) = \sigma_{t2} \quad 5.21$$

$$R_2 = R_1 + \Delta \quad 5.22$$

Po jednoduchých matematických úpravách byl odvozen vztah 5.26, kde vystupuje napětí na vnější stěně  $\sigma_{t2}$ , vnitřní poloměr  $R_1$ , tloušťka stěny  $\Delta$  a vnitřní tlak  $p_1$ . Pro lepší ilustraci samotného řešení byl výpočet doplněn opět o ukázkou s dosazenými hodnotami (viz 5.27).

$$\sigma_{t2} = C_1 + \frac{C_2}{R_2^2} = \frac{p_A \cdot R_1^2 - p_B \cdot R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{(p_A - p_B) \cdot R_2^2 \cdot R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2) \cdot R_2^2} \quad 5.23$$

$$\sigma_{t2} = p_A \cdot \frac{2 \cdot R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad 5.24$$

$$p_A = \frac{\sigma_{t2} \cdot [(R_1 + \Delta)^2 - R_1^2]}{2 \cdot R_1^2} = \frac{\sigma_{t2} \cdot (R_1^2 + 2 \cdot R_1 \cdot \Delta + \Delta^2 - R_1^2)}{2 \cdot R_1^2} \quad 5.25$$

$$p_A = \frac{\sigma_{t2} \cdot (2 \cdot R_1 \cdot \Delta + \Delta^2)}{2 \cdot R_1^2} \quad 5.26$$

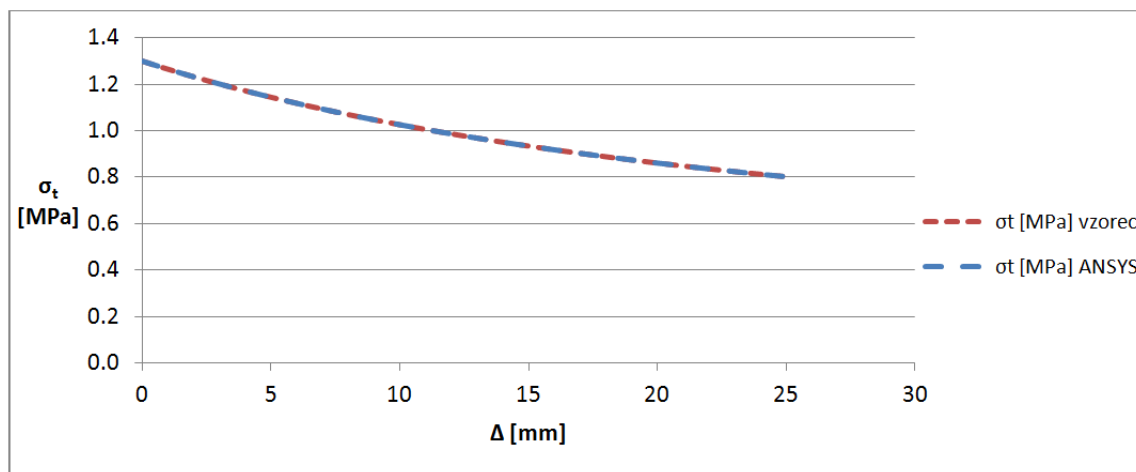
$$p_A = \frac{7,232 \cdot 10^6 \cdot (2 \cdot 0,05 \cdot 0,004 + 0,004^2)}{2 \cdot 0,05^2} = 0,601 \text{ MPa} \quad 5.27$$

Na první pohled je možné spatřit podobnost mezi vztahem 5.8 pro tenkostěnnou skořepinu a vztahem 5.26 pro válcové těleso (silnostěnnou nádobu). V případě, že by se u válcového tělesa uvažovala tloušťka výrazně menší než je poloměr, tak by bylo možné zanedbat její druhou mocninu, a tím by se získaly dva identické vztahy.

Pro ověření vztahu 5.26 byla provedena série výpočtů v programu ANSYS (verze 17.2) v rozhraní Static Structural. Pomocí tohoto softwaru byly určeny průběhy radiálního a tečného napětí pro následující verze geometrie potrubí: 50x54; 50x65; 50x75; 50x85 a 50x95 ( $R_1$  [mm] x  $R_2$  [mm]). Všechny tyto geometrie byly postupně zatíženy vnitřními tlaky 300, 500, 700 a 900 kPa.

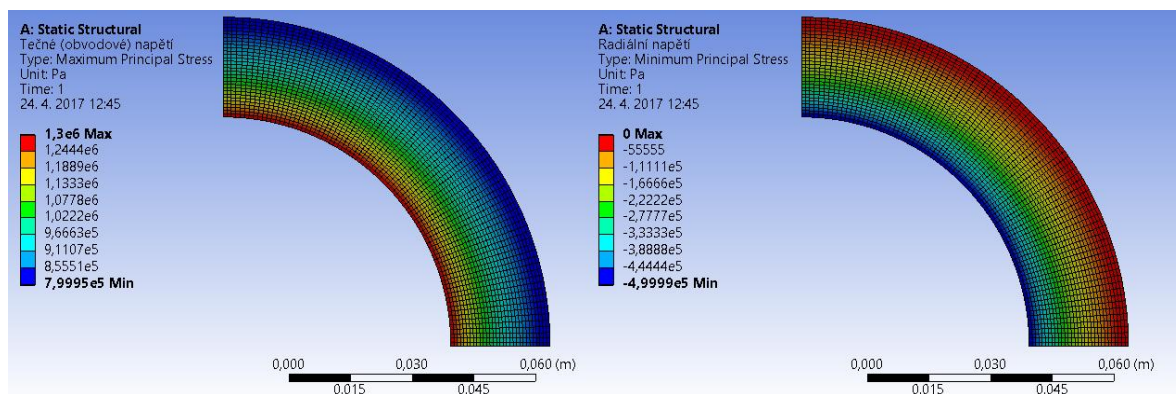
Výsledné průběhy tečného napětí po tloušťce stěny byly porovnány s tečnými napětími, které byly matematicky určeny pomocí předchozích vztahů. Všechny řešené případy se lišily od vypočtených hodnot maximálně v desítkách pascalů. Pro lepší představu jsou v *Graf 5.4* vyneseny průběhy obou tečných napětí v závislosti na tloušťce stěny, z čehož je patrné jak

si přesně odpovídají výsledky. Jedná se o hodnoty odpovídající geometrii 50x75 při zatížení 500 kPa. Byla tedy zvolena geometrie, u které se už očekával výrazný vliv tloušťky stěny na napětí, protože tenkostěnné kritérium, které bylo popsáno vztahem 5.10, vyšlo 0,05.



Graf 5.4: Porovnání obvodových napětí (ANSYS x výpočet)

Pro stejnou geometrii a zatížení, jaké bylo uvažováno u předchozího grafu, byl z rozhraní programu ANSYS získán Obr. 5.4, který graficky popisuje změnu obvodového i radiálního napětí. Zde pomocí vhodně zvolených vazeb bylo možné nahradit geometrii celého mezikruží pouze geometrií čtvrtkruhu a to mělo vliv na rychlost samotného výpočtu. Samozřejmě mnohem výraznější vliv na rychlost výpočtu mělo nahrazení potrubí, jakožto 3D tělesa, mezikružím, které odpovídá popisu 2D tělesa.



Obr. 5.4: Obvodové a radiální napětí (ANSYS)

Po použití obou matematických modelů (5.8 a 5.26) na data získaná z experimentu byl pro uvažovanou geometrii potrubí (vnitřní průměr 100 mm a tloušťka stěny 4 mm) stanoven rozdíl vyhodnocených vnitřních tlaků. Vztah 5.28 tedy popisuje rozdíl vyhodnocených tlaků v závislosti na tom, jestli uvažujeme změnu radiálního napětí po tloušťce stěny. Z této hodnoty vyplývá, že při uvažování silnostěnného modelu vychází výsledný tlak o 4 % vyšší než je tlak vypočtený u tenkostěnného modelu.

$$k_{\Delta} = \frac{(p_{1,silno} - p_{1,tenko})}{p_{1,tenko}} \cdot 100 = 4 \% \quad 5.28$$

## 5.4 Citlivostní analýza

Tato podkapitola se zabývá vlivem změny jednotlivých proměnných obou, již odvozených, matematických modelů na výsledný tlak. V jednoduchosti lze říct, že citlivostní analýza zjišťuje negativní dopad na výsledek způsobený změnou jednoho nebo několika hodnot. Takže pomocí ní lze určit, jak se změní výsledek, v případě, že byla špatně stanovena některá z vystupujících proměnných. Ze vztahu 5.29 (tenkostěnný model) a 5.30 (silnostěnný model) je patrné, že se tedy jedná o vliv změny přetvoření v obou směrech, modulu pružnosti v tahu, Poissonova čísla, vnitřního poloměru a tloušťky stěny.

$$p_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_t + \mu \cdot \varepsilon_m) \cdot \frac{\Delta}{R} \quad 5.29$$

$$p_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_t + \mu \cdot \varepsilon_m) \cdot \frac{(2 \cdot R \cdot \Delta + \Delta^2)}{2 \cdot R^2} \quad 5.30$$

Pomocí citlivostní analýzy lze odhadnout nejistotu vypočteného tlaku dle vztahu 5.29 a 5.30 pokud známe nejistoty jednotlivých vstupů do těchto vztahů.

Pro posouzení všech těchto vlivů je využito jednoduchých grafů, a proto je nutné stanovit určité hodnoty, které budou vystupovat jako neměnné pokud se nebude posuzovat jejich vliv. Jako hodnoty přetvoření byly zvoleny data z tenzometru 2 a to zhruba při maximálních měřených tlacích (viz. Tab. 5.3).

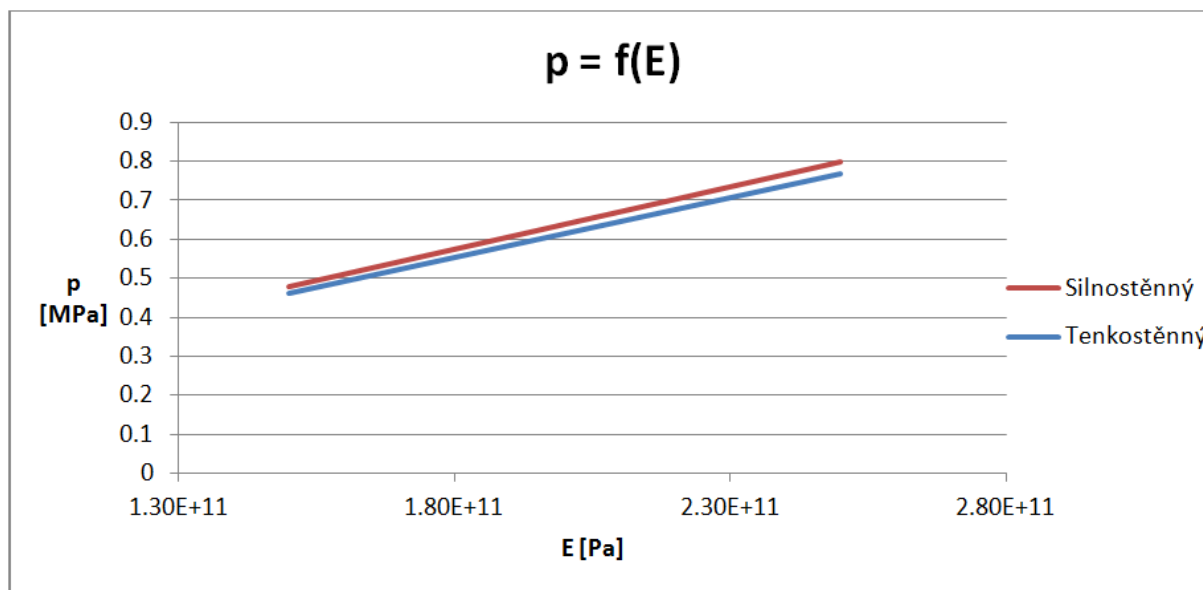
Tab. 5.3: Výchozí data pro citlivostní analýzu

<b>E</b>	<b>μ</b>	<b>ε<sub>t</sub></b>	<b>ε<sub>m</sub></b>	<b>R</b>	<b>Δ</b>
[GPa]	[-]	[μm/m]	[μm/m]	[mm]	[mm]
210	0,3	20	50	0,05	0,004

K popisu citlivosti modelů na jednotlivé veličiny jsou použity grafy a tabulky, jejichž rozsahy byly voleny s přihlédnutím k možným nepřesnostem, dosažitelných během měření.

### 5.4.1 Vliv změny modulu pružnosti v tahu (E)

Vliv změny modulu pružnosti v tahu pro obě varianty je lineární a dokonce platí, že když se změní modul pružnosti o deset procent, tak se i vyhodnocený tlak změní o deset procent.

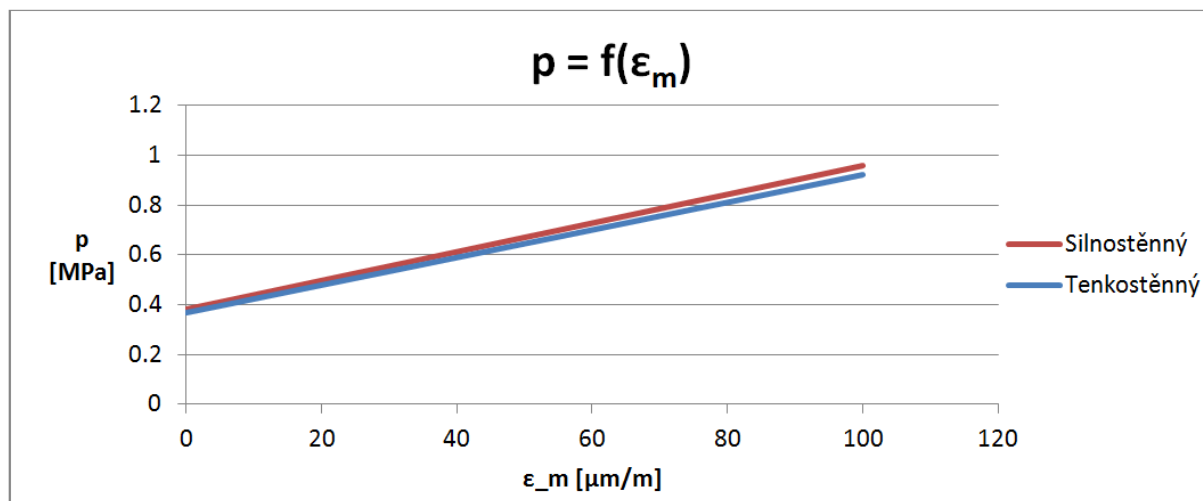


Graf 5.5: Vliv změny E

#### 5.4.2 Vliv změny přetvoření ( $\epsilon$ )

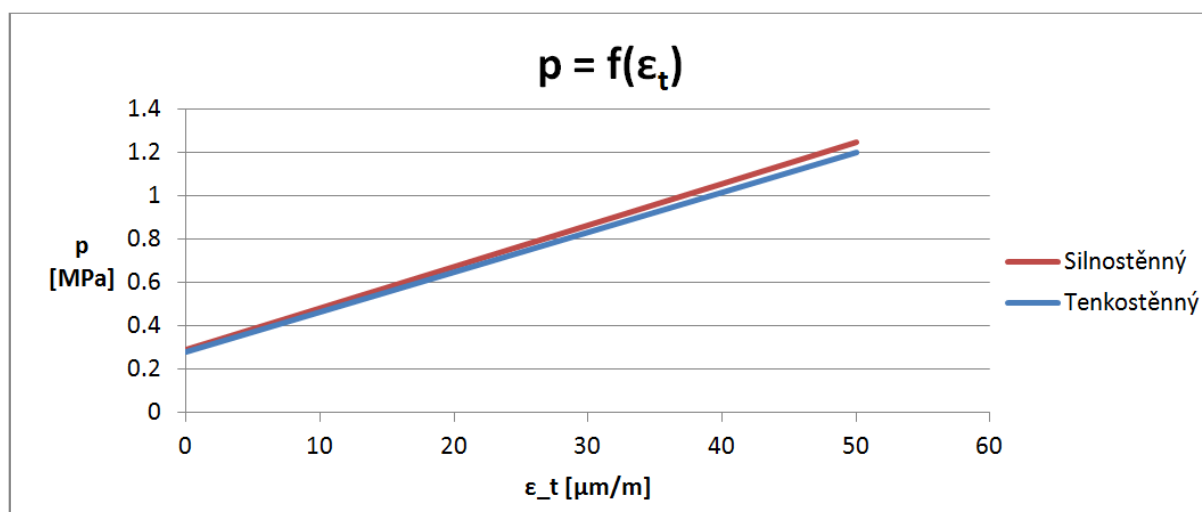
Změna přetvoření ve směru obvodovém i meridiánovém mění výsledný tlak lineárně, ale nelze zde přímo stanovit jednu hodnotu, která by řekla, o kolik procent se změní tlak v závislosti na procentuální změně jednotlivých přetvoření. To je způsobeno tím, že změna přetvoření je v těchto modelech úzce svázána s Poissonovým číslem. Navíc přetvoření se v průběhu měření často vzájemně mění a tak nelze tyto závislosti přesně podchytit pro všechny případy.

Následující grafy (Graf 5.6 a Graf 5.7), proto popisují pouze vliv změny jednoho přetvoření při zachování konstantního druhého. Dá se říct, že tak lze zachytit spíše chování modelu pro případ, kdy by měření přetvoření v jednom směru bylo chybné. Pak by se dalo posoudit, jaký vliv má chybně měřené přetvoření na výsledek a jestli to lze nějak redukovat, popřípadě zanedbat. Samozřejmě by bylo nutné znát aspoň přibližné hodnoty, v kterých se ve skutečnosti toto přetvoření nacházelo.



Graf 5.6: Vliv změny  $\epsilon_m$



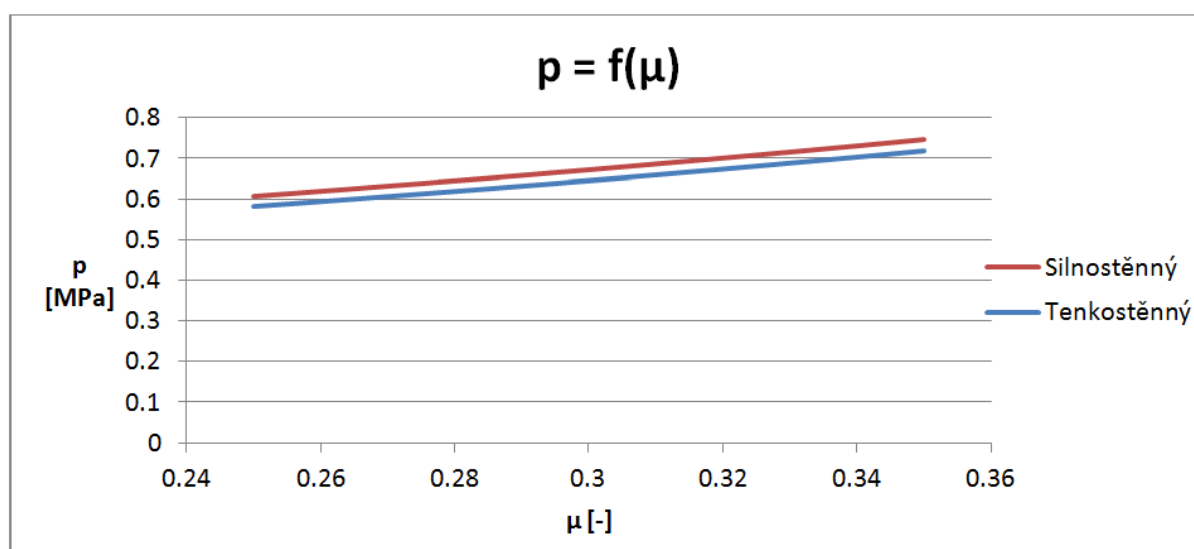


Graf 5.7: Vliv změny  $\epsilon_t$

Tyto grafy popisují pouze změnu jednoho z přetvoření, a proto také i při nulovém přetvoření v jednom směru zobrazují určité hodnoty tlaků. To je způsobeno nenulovým přetvořením v druhém směru. Je na nich velmi dobře vidět, jaké chyby by se dosáhlo v případě, že by selhalo měření deformace v jednom směru.

#### 5.4.3 Vliv změny Poissonova čísla ( $\mu$ )

Poissonovo číslo vystupuje v obou modelech ve stejné podobě a z toho lze lehce odvodit, že vliv na výsledné tlaky bude stejný. Samozřejmě je míněný procentuální vliv, nikoliv vliv na velikosti tlaků, který jak již bylo dříve napsáno, uvádí rozdíl mezi oběma modely 4 %. U Poissonova čísla už není lineární závislost, což je způsobeno mimo jiné i tím, že v obou případech vystupuje pod druhou mocninou. Následující graf (Graf 5.8) opět vychází ze zvolených hodnot ostatních neznámých.



Graf 5.8: Vliv změny  $\mu$

Při posuzování vlivů přetvoření bylo zdůrazněno, že jsou spojeny právě s Poissonovým číslem, což je logické už jen z definice samotného Poissonova čísla, která vychází z poměru relativních prodloužení v příčném a podélném směru. Proto je pro popsání těchto souvislostí použita *Tab. 5.4*, která vyjadřuje procentuální změnu tlaků v závislosti k počáteční hodnotě, která byla určena z výchozích hodnot pro celou citlivostní analýzu, kde byly měněny hodnoty přetvoření pro jednotlivé sloupce dat. Přetvoření byla volena jako podíly meridiánového k obvodovému a to z důvodu, že pro stejné poměry se vliv nemění, tím bylo možné pokrýt širší pásmo možností. Z důvodu použití procentuálního vyhodnocování není opět nutné rozlišovat tenkostěnný a silnostěnný model, protože u obou se vychází ze stejné závislosti.

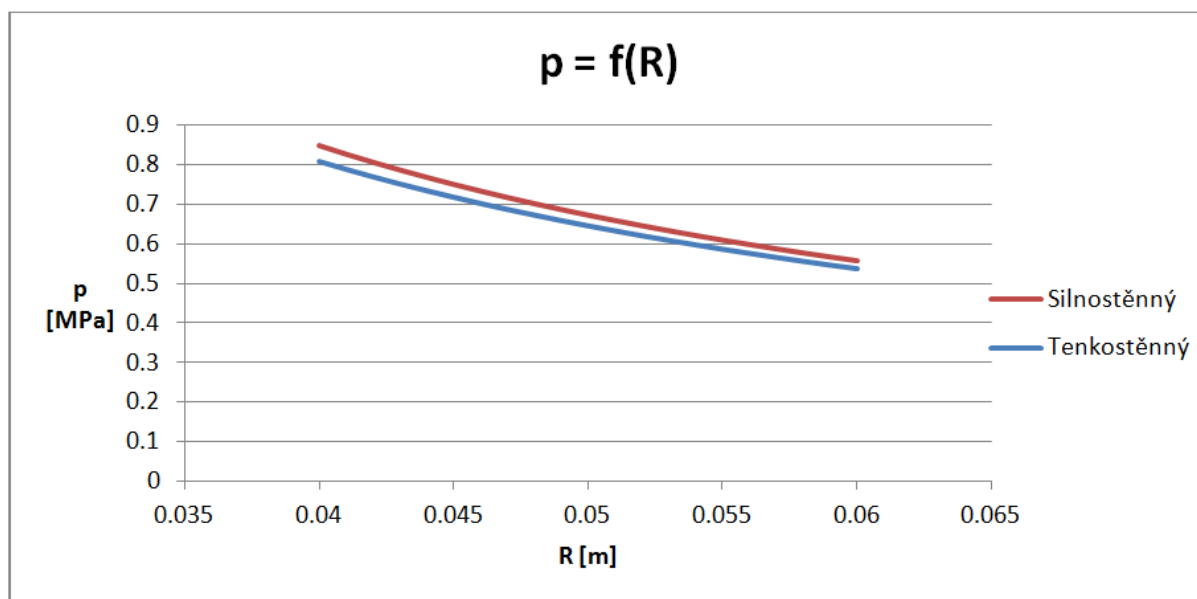
Z tabulky je možné vysledovat, že s rostoucí hodnotou meridiánového přetvoření v poměru k obvodovému roste také vliv změny Poissonova čísla na tlak. Tato tendence se dala odhadnout už z původního vztahu pro obvodové napětí, kde Poissonovo číslo vystupuje právě u meridiánového přetvoření.

Tab. 5.4: Vliv změny přetvoření a Poissonova čísla

Změna p [%]		$\varepsilon_m/\varepsilon_t$ [-]										
		0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4	5	6	7
$\mu$ [-]	0.27	-2.400	-2.896	-3.342	-3.744	-4.110	-5.525	-6.494	-7.198	-7.734	-8.154	-8.494
	0.275	-2.019	-2.434	-2.807	-3.143	-3.448	-4.632	-5.441	-6.030	-6.477	-6.829	-7.112
	0.28	-1.631	-1.964	-2.263	-2.533	-2.778	-3.727	-4.377	-4.849	-5.208	-5.490	-5.718
	0.285	-1.235	-1.486	-1.71	-1.914	-2.098	-2.812	-3.301	-3.656	-3.926	-4.139	-4.310
	0.29	-0.832	-0.999	-1.149	-1.285	-1.408	-1.886	-2.213	-2.451	-2.631	-2.773	-2.888
	0.295	-0.420	-0.504	-0.579	-0.647	-0.709	-0.949	-1.113	-1.232	-1.323	-1.394	-1.451
	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.305	0.429	0.513	0.589	0.657	0.719	0.961	1.126	1.246	1.337	1.409	1.466
	0.31	0.865	1.034	1.187	1.324	1.449	1.933	2.265	2.505	2.688	2.832	2.948
	0.315	1.310	1.565	1.795	2.002	2.190	2.918	3.417	3.780	4.055	4.271	4.446
	0.32	1.764	2.106	2.412	2.690	2.941	3.916	4.583	5.068	5.437	5.726	5.960
	0.325	2.227	2.655	3.040	3.388	3.704	4.927	5.763	6.372	6.834	7.198	7.491
	0.33	2.699	3.215	3.679	4.098	4.478	5.951	6.958	7.691	8.248	8.686	9.039

#### 5.4.4 Vliv změny vnitřního poloměru (R)

Změna vnitřního poloměru nemá na změnu tlaku lineární vliv, což se opět dalo určit z charakteristických rovnic těchto modelů. V podstatě se jedná o mocninovou funkci se záporným mocnitelem. To také vede, jako u jediné proměnné v obou modelech, na to, že s rostoucí hodnotou výsledný tlak klesá. To znamená, že graf charakterizující tuto závislost tvoří klesající křivka.

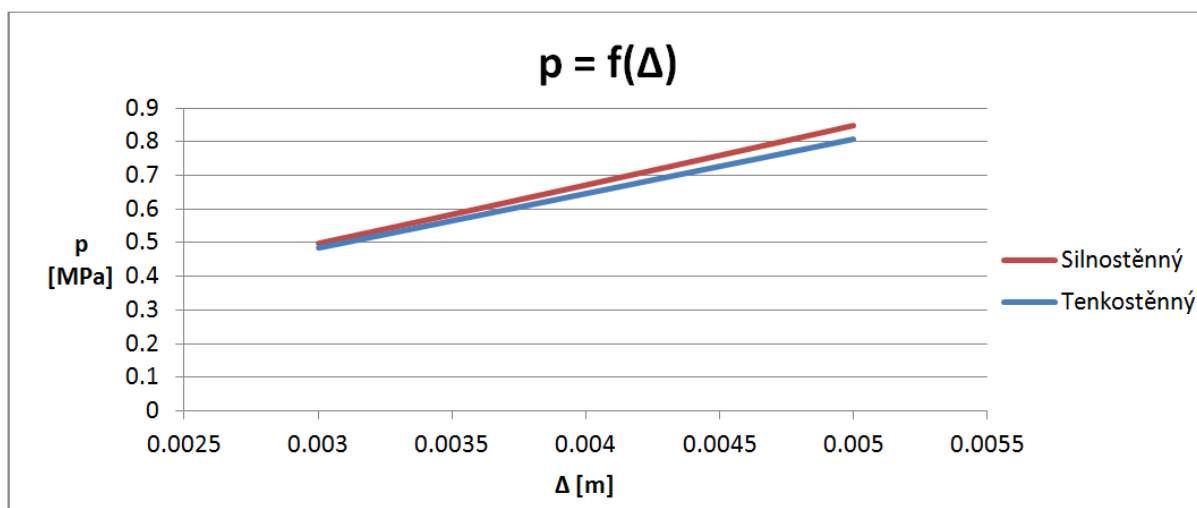


Graf 5.9: Vliv změny R

Při porovnání této závislosti u tenkostěnného a silnostěnného výpočtu je možné odhalit další rozdíl mezi těmito modely, který je způsoben tím, že silnostěnný model vzájemně provazuje vliv změny poloměru na velikosti tloušťky stěny. Takováto provázanost u tenkostěnného modelu není. Tato závislost je podrobněji popsána v následující podkapitole.

#### 5.4.5 Vliv změny tloušťky stěny ( $\Delta$ )

Zde je pravděpodobně největší rozdíl mezi oběma modely, co se citlivostní analýzy týče. Je to logické už jen z toho důvodu, že u silnostěnného výpočtu je přikládána tloušťce stěny vyšší pozornost. U tenkostěnného modelu vystupuje tato proměnná pouze jako člen, kterým se celá rovnice násobí. Z matematického pohledu zde vystupuje obdobně jako modul pružnosti v tahu a i proto, má stejný vliv na celý výpočet jako on. To znamená, že deseti procentní změna tloušťky stěny vyvolá deseti procentní změnu tlaku. U silnostěnného výpočtu se už nejedná o lineární závislost, protože zde vystupuje tloušťka stěny pod druhou mocninou.



Graf 5.10: Vliv změny  $\Delta$

Při posuzování vlivu změny vnitřního poloměru u silnostěnného modelu bylo zmíněno, že je úzce propojený s hodnotou tloušťky stěny. Toto provázání mimo jiné vylučuje použití tenkostěnného modelu pro tělesa s větší tloušťkou stěny v poměru k poloměru a to z důvodu, že nelze zanedbat zvýšený vliv tloušťky. Tab. 5.5 udává provázanost vlivu změny poloměru a tloušťky na výsledný vztah u silnostěnného modelu. Jako cílová hodnota byla stanovena hodnota z výchozího zadání.

Tab. 5.5: Vliv změny tloušťky stěny a vnitřního poloměru (silnostěnný)

Změna p [%]		$\Delta$ [mm]								
		3	3.25	3.5	3.75	4	4.25	4.5	4.75	5
R [mm]	45	-17.201	-10.060	-2.882	4.334	11.586	18.875	26.202	33.566	40.866
	46	-19.058	-12.082	-5.070	1.977	9.059	16.177	23.331	30.520	37.744
	47	-20.833	-14.015	-7.162	-0.276	6.644	13.598	20.587	27.609	34.665
	48	-22.532	-15.865	-9.165	-2.432	4.334	11.132	17.962	24.825	31.721
	49	-24.160	-17.637	-11.082	-4.496	2.121	8.769	15.449	22.160	28.903
	50	-25.721	-19.336	-12.921	-6.475	0	6.505	13.041	19.606	26.202
	51	-27.219	-20.966	-14.685	-8.374	-2.035	4.334	10.731	17.157	23.612
	52	-28.658	-22.532	-16.379	-10.197	-3.988	2.248	8.513	14.806	21.126
	53	-30.041	-24.037	-18.007	-11.950	-5.866	0.245	6.382	12.547	18.738
	54	-31.372	-25.485	-19.573	-13.635	-7.671	-1.682	4.334	10.375	16.441
	55	-32.653	-26.879	-21.080	-15.257	-9.409	-3.536	2.362	8.285	14.232

Tab. 5.6: Vliv změny tloušťky stěny a vnitřního poloměru (tenkostěnný)

Změna p [%]		$\Delta$ [mm]								
		3	3.25	3.5	3.75	4	4.25	4.5	4.75	5
R [mm]	45	-16.667	-9.722	-2.778	4.167	11.111	18.056	25.000	31.944	38.889
	46	-18.478	-11.685	-4.891	1.902	8.696	15.489	22.283	29.076	35.870
	47	-20.213	-13.564	-6.915	-0.266	6.383	13.032	19.681	26.330	32.979
	48	-21.875	-15.365	-8.854	-2.344	4.167	10.677	17.188	23.698	30.208
	49	-23.469	-17.092	-10.714	-4.337	2.041	8.418	14.796	21.173	27.551
	50	-25.000	-18.750	-12.500	-6.250	0	6.250	12.500	18.750	25.000
	51	-26.471	-20.343	-14.216	-8.088	-1.961	4.167	10.294	16.422	22.549
	52	-27.885	-21.875	-15.865	-9.856	-3.846	2.163	8.173	14.183	20.192
	53	-29.245	-23.349	-17.453	-11.557	-5.660	0.236	6.132	12.028	17.925
	54	-30.556	-24.769	-18.981	-13.194	-7.407	-1.620	4.167	9.954	15.741
	55	-31.818	-26.136	-20.455	-14.773	-9.091	-3.409	2.273	7.955	13.636

Aby bylo možné posoudit tuto provázanost s ohledem na volbu modelu, byla vytvořena obdobná tabulka (*Tab. 5.6*) pro tenkostěnný výpočet, kde tato spojitost není. V zobrazovaném rozsahu je možné dohledat rozdíl maximálně dvou procent, přičemž v bližším okolí uvažovaného výsledku jsou to řádově desetiny procent. Z toho lze usoudit, že řešená geometrie odpovídá spíše tenkostěnnému tělesu, protože zde není tak výrazný vliv tloušťky stěny. Je nutné, ale dodat, že obě tabulky byly počítány svými vlastními modely, mezi kterými již byl stanoven rozdíl výsledků na 4 %, a tyto tabulky vyjadřují pouze vliv změny geometrie na změnu výsledného tlaku.

## 5.5 Kalibrační model

Tato podkapitola se zabývá dalším možným způsobem, jak zpracovat naměřené deformace a stanovit tlak v potrubí. V porovnání s předchozími metodami se jedná o velmi rozdílný přístup, protože u tenkostěnného i silnostěnného modelu se vycházelo ze znalosti geometrie a základů mechaniky těles. U této metody není nutné znát podrobnosti o geometrii a ani popis tělesa z pohledu mechaniky.

Celá metoda je založena na velmi jednoduchém principu, kdy se uvažuje, že závislost tlaku na přetvoření je lineární, a proto stačí znát přetvoření a tlak ve dvou bodech. Hlavním problémem této metody při použití v praxi je, jak určit tlaky v těchto dvou bodech, když právě měření tlaku je cílem této metody. Ve spoustě případů je, ale možné tyto dvě tlakové úrovně u potrubí nastavit (stav bez kapaliny a stav s plným potrubím; zatížení statickým tlakem od spodní nádrže a zatížení potrubí statickým tlakem od horní nádrže; zavřený a otevřený ventil a podobně). Pro oba předchozí modely bylo také nutné znát tlak v jednom bodě a to z důvodu nulování tenzometrů, ačkoliv u nich by stačilo zvolit některý stav a k němu poté vztahovat rozdíly tlaků. Tak by sice nebylo možné určit přímo tlak v potrubí, ale šlo by stanovit nárůst tlaku od určitého bodu.

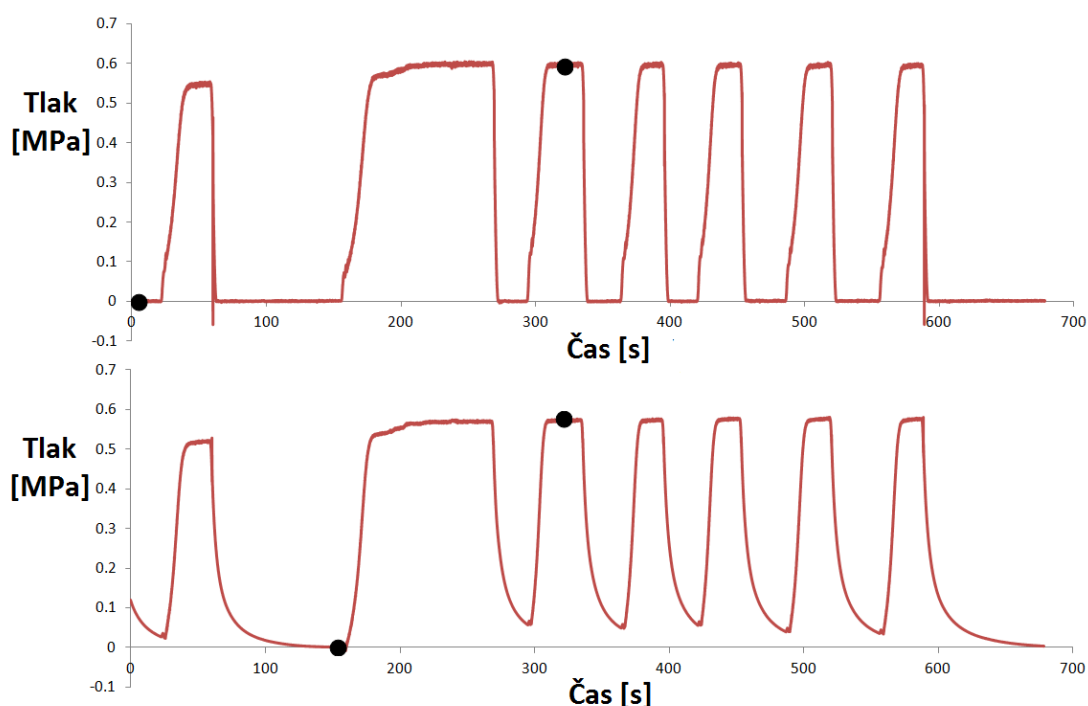
Nyní je, ale nutné znát přímo hodnoty tlaků, kterým odpovídá přetvoření. Jeden bod lze určit u většiny případů a to statický stav, kdy se kapalina nepohybuje. Druhý bod je pak potřeba stanovit jiným způsobem, přičemž nelze považovat za jiný bod později měřenou statiku nebo jenom mírně zatížený stav. Při takto změřených bodech, jejichž rozdíl tlaků by byl velmi malý, by lineární proložení a následné dopočítání tlaků, které by mohly být mnohem vyšší, vykazovalo výraznou chybu. Proto není možné zvolit libovolné body, ale je nutné počítat s tím, že tato metoda vykazuje tendenci, že čím dále jsou od sebe vzdáleny tlaky uvažovaných bodů, tím přesnější dostáváme obvykle výstupy. Na druhou stranu je nutné ještě podotknout, že v blízkosti těchto bodů dosahujeme nejvyšších přesností, proto je nejvhodnější volit body tak, aby se nacházely v oblasti, kde chceme nejpresnější výsledky.

Na správně zvolených kalibračních bodech závisí celá tato metoda, proto by bylo potřeba, za účelem stanovení určitých kritérií a vysledování tendencí, jak tyto body správně volit, provést větší množství experimentů a vyhodnocení. V rámci této práce bylo provedeno několik vyhodnocení dat uvedeného experimentu pro různě navolené kalibrační body, což bylo umožněno tím, že byly dostupné změřené tlaky během celého měření, z čehož byly sestaveny některé závěry, ale nelze říct, že se jedná o pravidla, kterými je nutné se řídit.

Před samotným vyhodnocením bylo potřeba provést přípravu dat, která je popsána v podkapitole *5.1 Příprava dat*. Pro tuto metodu ztrácí význam nulování signálu přetvoření, protože je přetvoření vztahováno přímo k hodnotám tlaků a vynulování nemá vliv na sklon a délku kalibrační přímk, pouze by v grafické závislosti (*Graf 5.11*) došlo k posunutí po ose přetvoření. Nulování by se muselo provést v případě, že by se dávalo do závislosti obvodové

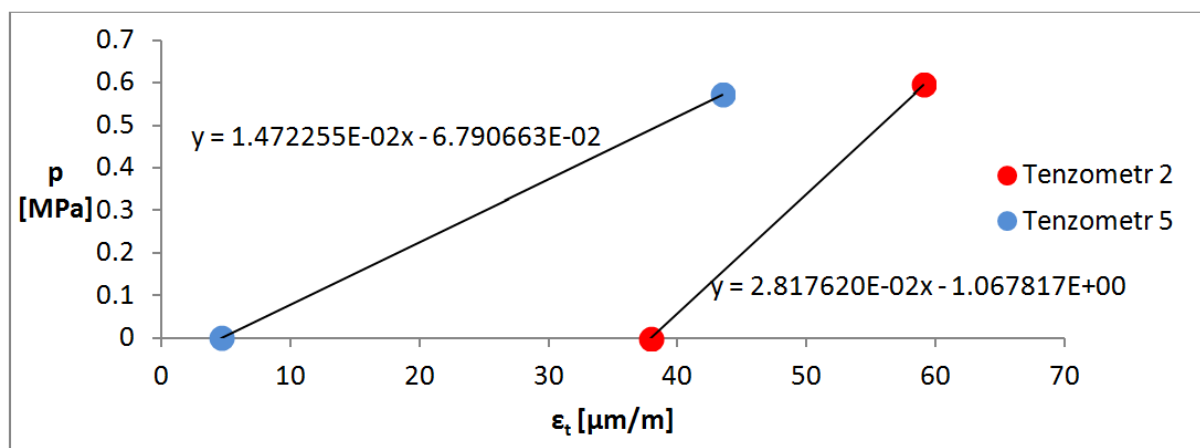
napětí a tlak, ale z důvodu, že uvažujeme, že o geometrii potrubí nemáme dostatek informací, tak obvodové napětí nemůžeme určit a vyhodnocujeme pouze přetvoření. Ze stejného důvodu jako bylo u tenkostěnného modelu uvažováno pouze tečné napětí, tak zde bylo upřednostněno tečné přetvoření.

Volba bodů proběhla v souladu s předchozími návrhy a byly zvoleny body, které jsou znázorněny na Obr. 5.5. Jako kalibrační stavy byly vybrány úseky, kdy bylo možné považovat tlaky za konstantní, to bylo provedeno za účelem získání dat, které nebyly ovlivněny žádnými výraznými nestacionárními jevy popřípadě jinými stavy, které by znatelně ovlivnily výsledky.



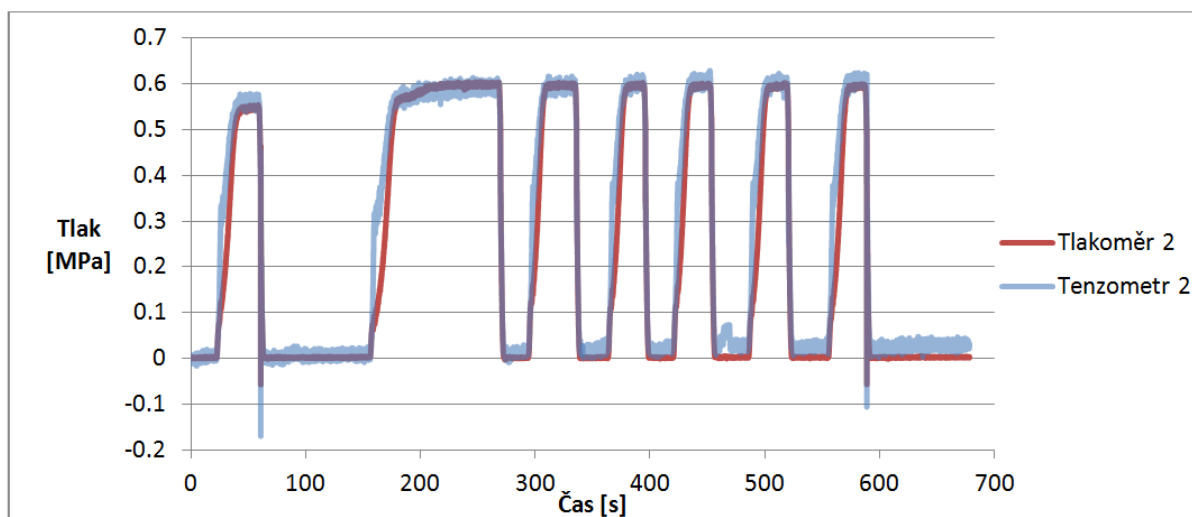
Obr. 5.5: Volba kalibračních bodů

Dalším krokem bylo určení rovnice kalibrační přímky, k tomu byly použity vestavěné funkce programu Microsoft Excel. Tyto rovnice jsou vypsány v následujícím grafu (Graf 5.11).

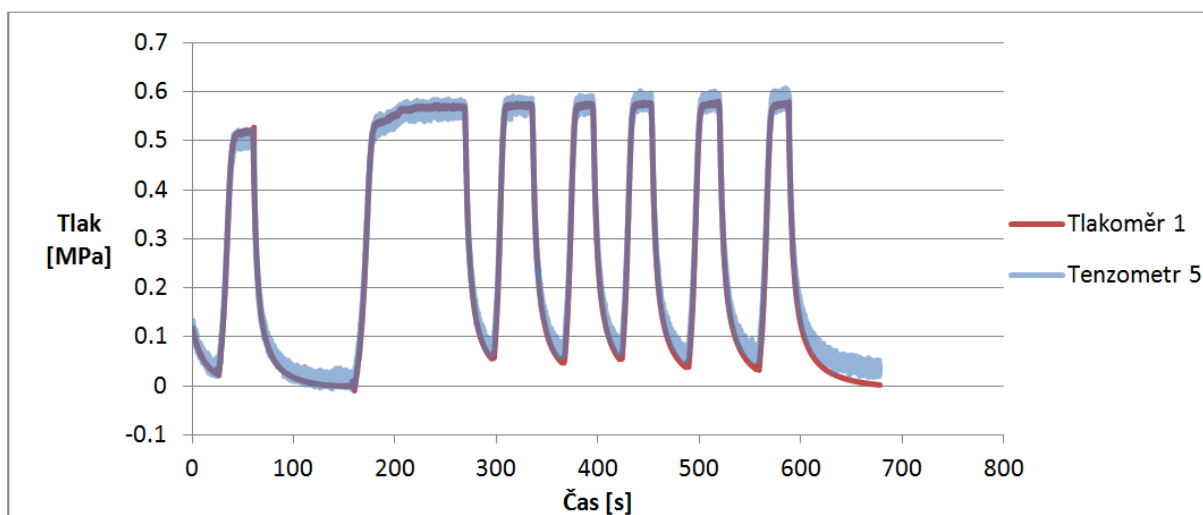


Graf 5.11: Proložení kalibračních bodů přímkou

Nyní je možné použít rovnici této regresní přímky na měřený signál tečného přetvoření a dopočítat průběh vnitřních tlaků. Jak již bylo zmíněno, tak tato metoda dosahuje vysokých přesností především v okolí kalibračních bodů, což je patrné z výsledných grafů (*Graf 5.12* a *Graf 5.13*).



Graf 5.12: Vyhodnocení – tenzometr 2 (kalibrační)



Graf 5.13: Vyhodnocení – tenzometr 5 (kalibrační)

Srovnání kalibračního modelu s tenkostěnným a silnostěnným modelem je provedeno v kapitole 6 *Srovnání výsledků*. Pro tento model nelze stanovit jednoznačnou odchylku od předchozích modelů, jak to bylo možné v rovnici 5.28 pro první dva modely.

### 5.5.1 Zpětné stanovení modulu pružnosti v tahu

V případě použití kalibrační metody není nutné příliš znát podrobnosti o geometrii nebo materiálu, ale pokud by byla geometrie známá, tak by bylo možné zpětnou aplikací tenkostěnného, popřípadě silnostěnného modelu určit materiálové charakteristiky.

Nejdříve je potřeba uvědomit si, že nyní už je nutné pracovat s vynulovanými daty, ale vynulování tentokrát nebylo prováděno pomocí měřeného bodu, který byl pracovně označen jako *statika*. Ale nulovalo se pomocí dvou kalibračních bodů a to tak, že se hodnoty obou přetvoření a hodnoty tlaků vzájemně odečetly, tím byla stanovena změna tlaku i změna deformace mezi společnými body.

Další krok spočívá v upravení vztahů pro tenkostěnný model (5.32) a silnostěnný model (5.33) do podob pomocí, kterých lze stanovit hodnoty modulu pružnosti v tahu E.

$$\sigma_t = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_t + \mu \cdot \varepsilon_m) \quad 5.31$$

$$p = \frac{\sigma_t \cdot \Delta}{R} \quad 5.32$$

$$p = \frac{\sigma_t \cdot (2 \cdot R \cdot \Delta + \Delta^2)}{2 \cdot R^2} \quad 5.33$$

Po jednoduchých matematických úpravách lze získat pro modul pružnosti v tahu vzorce 5.34 a 5.35.

Tenkostěnný: 
$$E = \frac{p \cdot R}{\Delta} \cdot \frac{1 - \mu^2}{\varepsilon_t + \mu \cdot \varepsilon_m} \quad 5.34$$

Silnostěnný: 
$$E = \frac{p \cdot 2 \cdot R^2}{2 \cdot R \cdot \Delta + \Delta^2} \cdot \frac{1 - \mu^2}{\varepsilon_t + \mu \cdot \varepsilon_m} \quad 5.35$$

Z kalibračních bodů byly stanoveny hodnoty tlaků a přetvoření, které jsou zapsány v Tab. 5.7.

Tab. 5.7: Hodnoty ke stanovení materiálových charakteristik

Tenzometr 2				
R	Δ	p	ε <sub>t</sub>	ε <sub>m</sub>
[mm]	[mm]	[MPa]	[μm/m]	[μm/m]
50	4	0,596	53,16	21,16
Tenzometr 5				
R	Δ	p	ε <sub>t</sub>	ε <sub>m</sub>
[mm]	[mm]	[MPa]	[μm/m]	[μm/m]
50	4	0,572	9,95	38,87

Po aplikaci vztahů pro stanovení modulu pružnosti v tahu E byly získány hodnoty této materiálové charakteristiky (viz Tab. 5.8), přičemž bylo uvažováno Poissonovo číslo rovno 0,3.



Tab. 5.8: Stanovené materiálové charakteristiky

Tenzometr 2			
Model	Materiálová charakteristika	Hodnota	Jednotka
Tenkostěnný	E	182,7	[GPa]
Silnostěnný	E	175,7	[GPa]
Tenzometr 5			
Model	Materiálová charakteristika	Hodnota	Jednotka
Tenkostěnný	E	155,5	[GPa]
Silnostěnný	E	149,5	[GPa]

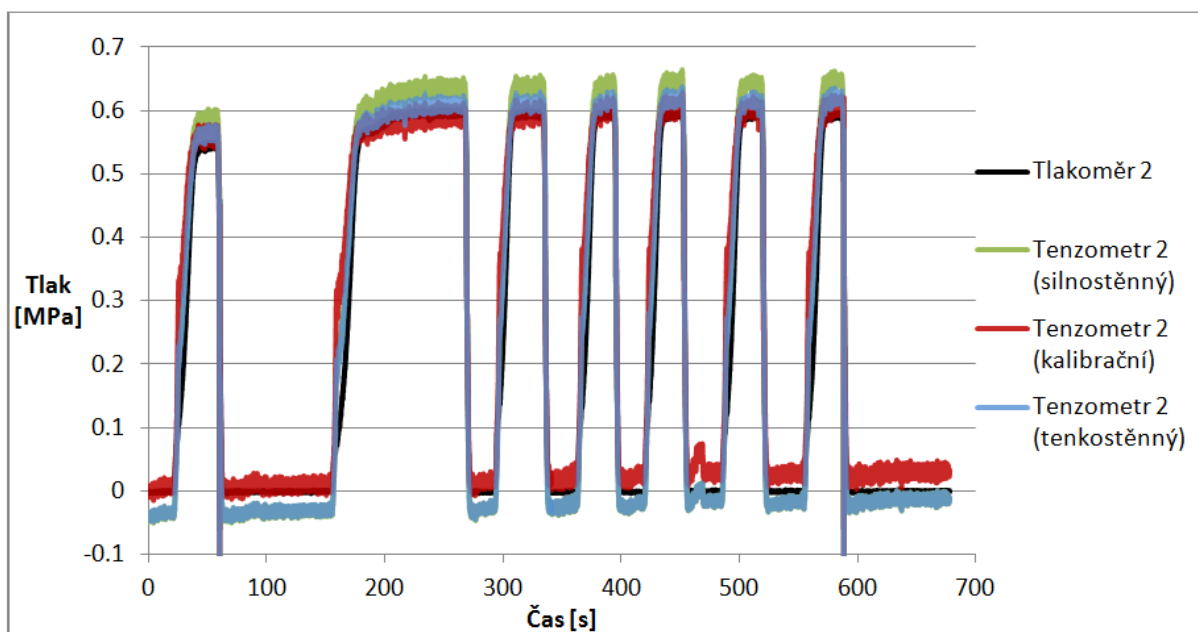
Podle výsledků z tenkostěnného i silnostěnného modelu se dalo předpokládat, že vypočtené hodnoty materiálových konstant budou nižší než uvažované. U materiálu použitého experimentálního potrubí by se dala očekávat nižší hodnota modulu pružnosti v tahu než 210 GPa, ale i přesto jsou stanovené hodnoty příliš nízké. Youngův modul o velikosti 150 GPa je pro použitý materiál nereálný, ale pro uvažovaná data u tenzometru 5 dosahuje právě této hodnoty.

## 6 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

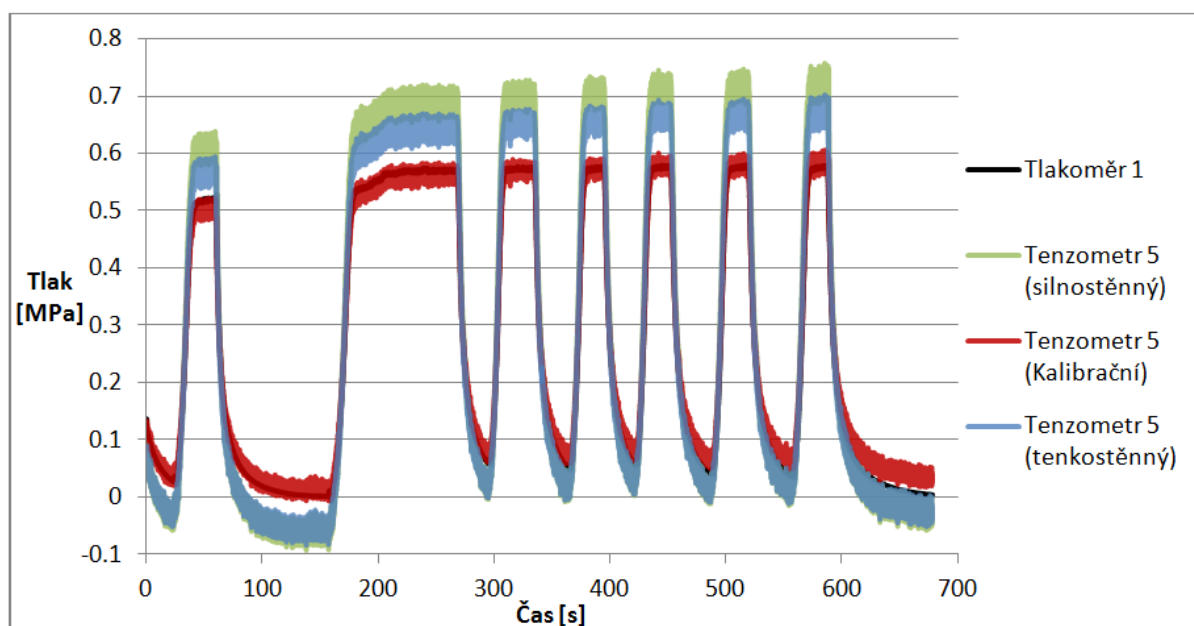
V této kapitole jsou porovnány všechny tři vyhodnocovací modely mezi sebou a především zde dochází ke srovnání vyhodnocených dat s naměřenými údaji z tlakoměrů. Jedná se tedy v podstatě o popsání chyby jednotlivých modelů pro tento experiment, kdy tlakový průběh z tlakoměrů je považován za shodný s reálnými tlaky v potrubí, dosahovaných během měření.

Jak již bylo řečeno, tak mezi výsledky ze silnostěnného a tenkostěnného modelu existuje neměnná závislost, která byla definována vztahem 5.28 a její hodnota činí 4 %. Tato závislost lze stanovit pouze u těchto dvou modelů a to z důvodu, že vycházejí z obdobného matematického základu. Kalibrační model naproti tomu je založen na velmi rozdílném principu, kdy nelze přesně stanovit, takto definovanou provázanost. Je tedy nutné přistoupit k porovnání vyhodnocovacích vlastností těchto modelů jiným způsobem.

První možností je základní zanesení všech tří stanovených tlakových průběhů do jednoho grafu (*Graf 6.1* a *Graf 6.2*). Toto porovnání slouží, ale spíše k prvnímu vizuálnímu srovnání a nepřináší příliš přesné informace. Problémem je také překrytí dat ze silnostěnného modelu daty tenkostěnného modelu při nižších tlacích, kde díky stejnému nulování vychází téměř shodně, protože u takto nízkých tlaků 4 % nepřináší velký rozdíl. Je zde, ale patrný rozdílný přístup k nulování dat mezi kalibračním modelem a ostatními, kdy se u kalibračního modelu přímo tárování neprovádělo.

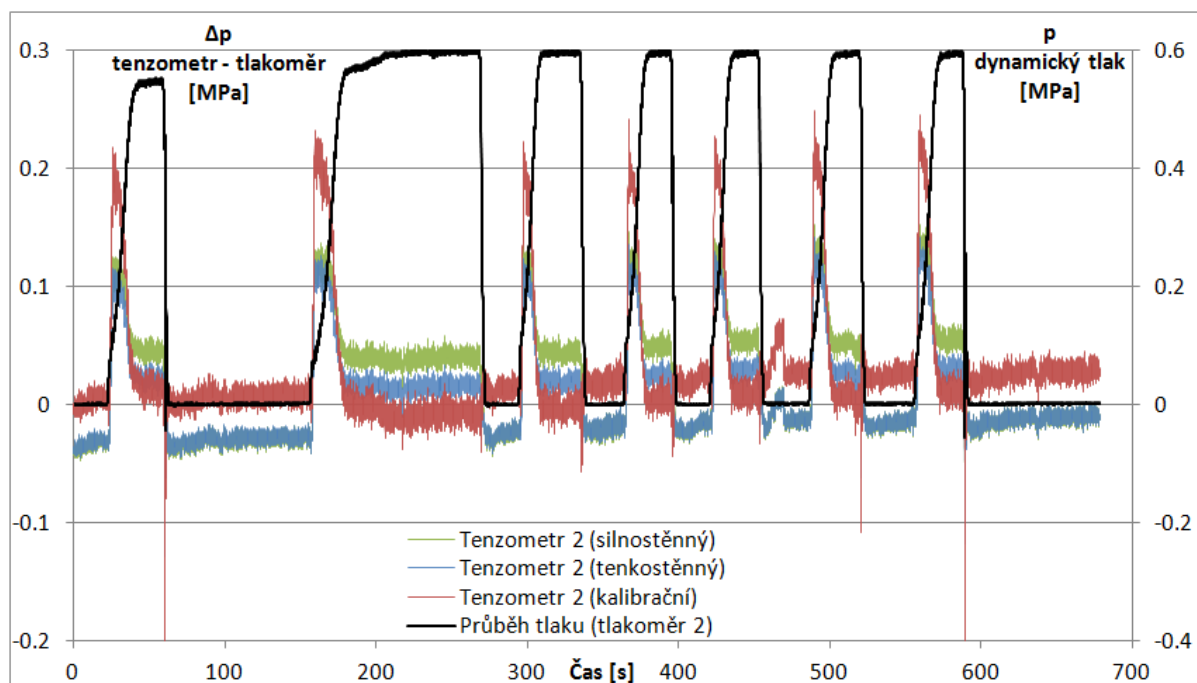


Graf 6.1: Porovnání průběhů tlaku (tenzometr 2)

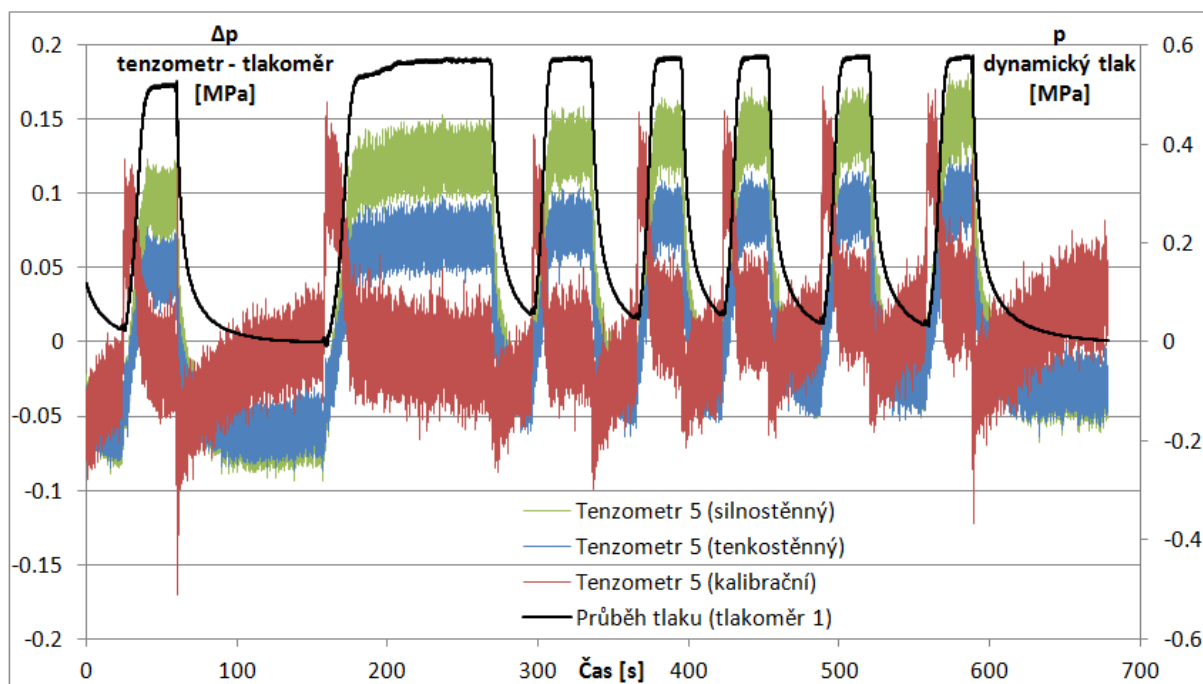


Graf 6.2: Porovnání průběhů tlaku (tenzometr 2)

Z pohledu porovnání průběhu je vhodnější se zaměřit na rozdíly tlaků vyhodnocených a měřených, a proto následující dva grafy (*Graf 6.3* a *Graf 6.4*) vykreslují tento rozdíl v závislosti na čase. Pro lepší představu průběhů jsou grafy na vedlejší ose doplněny o reálné průběhy tlaků, které odpovídají signálům z tlakoměrů.



Graf 6.3: Porovnání rozdílů tlaků v závislosti na čase (tenzometr 2)



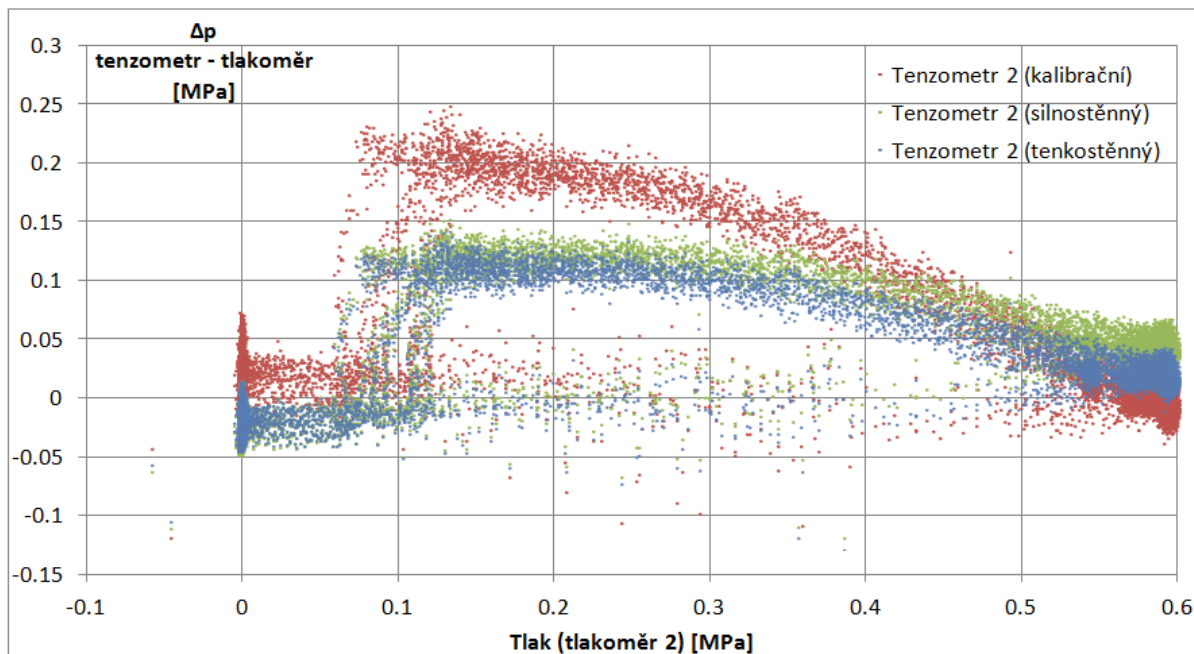
Graf 6.4: Porovnání rozdílů tlaků v závislosti na čase (tenzometr 5)

Z těchto grafů lze již vyvodit některé závěry. Grafické závislosti patřící tenkostěnnému a silnostěnnému modelu se od sebe liší pouze ve velikosti hodnot rozdílů tlaků (vertikální osa) a nejsou nijak posunuty po časové horizontální ose, což nepřímo potvrzuje jejich vzájemnou provázanost a lze tak získat další důkaz platnosti již odvozené 4% závislosti. U těchto dvou modelů se také opět projevil vliv posuvu nuly, kdy by díky nulování měly být hodnoty rozdílů tlaků při nulovém tlaku téměř nulové. U kalibrační metody lze říci, že největší přesnosti, tedy nejmenšího rozdílu měřeného a vyhodnocovaného tlaku, se dosahuje při tlacích, které jsou nejbližší tlakům kalibračních bodů, a se vzdáleností od těchto tlaků přesnost klesá. I u kalibrační metody se projevil posuv nuly, což bylo očekávané, protože přímo ovlivnil hodnoty přetvoření, s kterými všechny modely pracují.

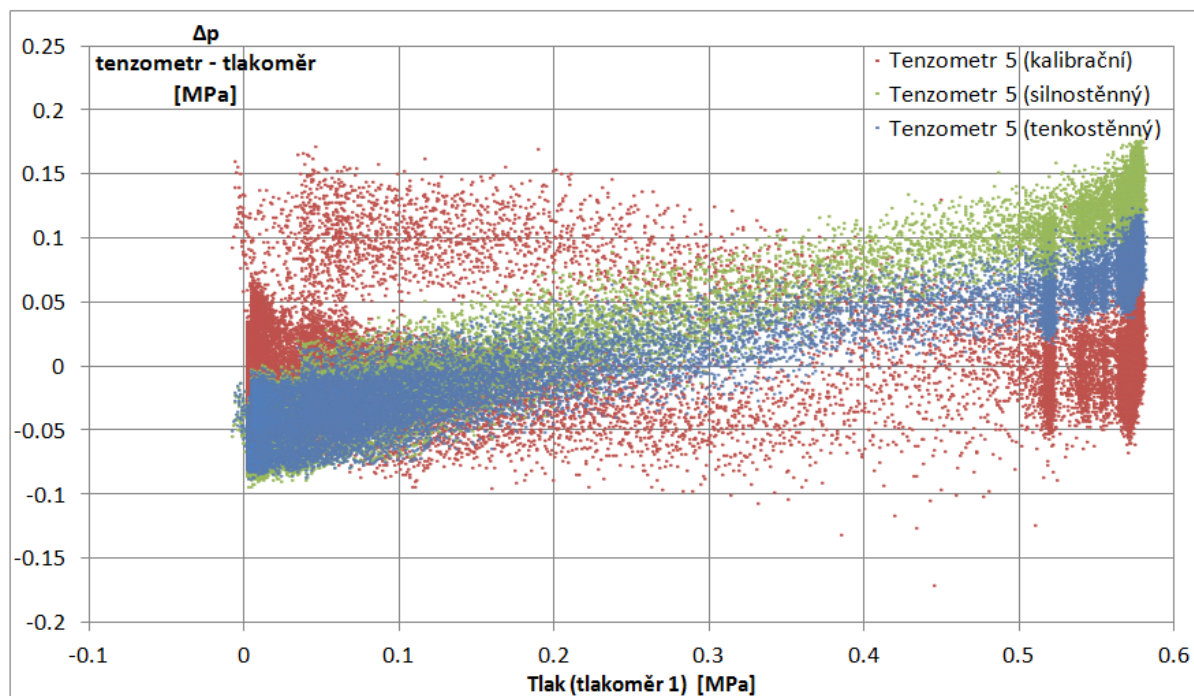
Další závěry lze stanovit již pouze pro jednotlivé tenzometrické měření, protože po aplikaci stejných vzorců na data ze dvou rozdílných deformačních snímačů, se výsledné chování tlaků výrazně liší. Tenzometr 2 vykazuje u tenkostěnného a silnostěnného modelu nejvyšší rozdíly tlaku oproti skutečnosti v oblastech, kdy docházelo k otevírání klapky, což pravděpodobně znamená, že snímač byl umístěn do vzdálenosti, kdy byl ještě silně ovlivňován chováním klapky, která vyvolávala při svém otevírání určitý ráz, popřípadě jinak ovlivňovala deformaci potrubí v místě umístění snímače.

Podobné chování se u tenzometru 5 neprojevilo, ale na druhou stranu tento snímač po vyhodnocení vykazuje větší rozdíl tlaku oproti měřenému než u tenzometru 2, přičemž tato chyba roste v závislosti na velikosti tlaku. Nelze s jistotou říci, že rozdíl vznikl nepřesně měřenou deformací snímače 5, protože celý model je založen i na jiných proměnných, které mohly být špatně stanoveny, popřípadě v místech tenzometru 5 mohlo být potrubí při rostoucím tlaku výrazněji namáháno v osovém směru, což by vedlo ke zkreslení dat přetvoření. V případě, že by se jednalo o chyby při stanovování tloušťky stěny, poloměru nebo materiálových vlastností, bylo by možné model přepočítat pro ověřené hodnoty, ale pro případ změny vlivu namáhání v osovém směru by nebylo možné tenkostěnný a silnostěnný model se zvýšenou přesností aplikovat. U tenzometru 5 docházelo při měření deformace také k výraznější oscilaci hodnot přetvoření, než tomu bylo u tenzometru 2.

Pro lepší představu předcházejících úvah je vhodné vykreslit závislost rozdílu vyhodnoceného tlaku a měřeného tlaku vůči velikosti tlaku z tlakoměru, čímž by byla graficky zobrazena chyba vyhodnocení pro jednotlivé tlaky. Tuto závislost zobrazuje *Graf 6.5* a *Graf 6.6*.



**Graf 6.5:** Porovnání rozdílů tlaků v závislosti na velikosti tlaku (tenzometr 2)



**Graf 6.6:** Porovnání rozdílů tlaků v závislosti na velikosti tlaku (tenzometr 5)

Pro číselné vyjádření chyby tohoto určitého měření je možné stanovit směrodatnou odchylku. K posouzení chyby je také často používaná maximální hodnota, ale u tohoto případu je nevhodné vyjadřovat tuto hodnotu, protože měřený signál obsahoval několik extrémních bodů, které neměly pro řešení význam.

Tab. 6.1: Směrodatná odchylka

Tenzometr 2		
Model	Hodnota	Jednotka
Tenkostěnný	29,2	[kPa]
Silnostěnný	39,4	[kPa]
Kalibrační	32,2	[kPa]
Tenzometr 5		
Model	Hodnota	Jednotka
Tenkostěnný	53,4	[kPa]
Silnostěnný	76,5	[kPa]
Kalibrační	40,9	[kPa]

(Pracovalo se s hodnotami určitého měření, proto nelze tyto hodnoty brát jako závazné. Slouží spíše k posouzení přesnosti uvedených modelů pro daný experiment.)

## 7 NAVRŽENÍ POSTUPU MĚŘENÍ

Posledním cílem této práce bylo navržení postupu měření tlaku pomocí nalepovacích tenzometrů pro reálný případ.

Nejdříve je nutné posoudit požadovanou aplikaci z pohledu mechaniky, tedy jestli lze aplikovat na tento určitý případ vztahy, které byly odvozeny v této práci. To znamená pro tenkostěnný model, jestli lze uvažovat měřené potrubí za tenkostěnnou membránovou skořepinu. Omezení membránové teorie skořepin, lze dohledat v rešerši této práce. Proto je důležité posoudit zatížení a ukotvení měřeného objektu. Použití tenkostěnného modelu je samozřejmě omezeno také tloušťkou stěny v závislosti na vnitřním průměru potrubí.

Silnostěnný model už pracuje s vlivem tloušťky stěny, ale z pohledu zatížení vychází z obdobných podmínek jako tenkostěnný model. Poslední model je založen na jiném principu, ale pro jeho použití je nutné dokázat stanovit vhodné kalibrační body, jejichž volba je velmi důležitá. Opět je této problematice věnován čas u popisu kalibrační metody, ale pro stanovení podmínek volby těchto bodů by bylo potřeba provést rozsáhlejší výzkum.

V případě, že byla posouzena teoretická část za splněnou, je možné přistoupit k měření deformace. Při volbě nalepovacích tenzometrů je nutné přihlédnout k celé řadě faktorů, které jsou s jejich problematikou spojeny, jako například vliv teploty, vliv vlhkosti, maximální zatížení nebo měřitelné deformace. Samozřejmě je potřeba volit snímače, tak aby bylo možné měřit rovinou napjatost, což vede obvykle k volbě tenzometrických růžic a křížů. Před umístěním snímače je vhodné odhadnout, jestli nebude mít na měření přetvoření vliv některá z blízkých armatur.

Samotné umístění snímače by se mělo řídit jistým postupem, který doporučuje výrobce tenzometru a to včetně použití doporučených lepidel, fólií a dalších pomůcek. Základní popis nalepování tenzometrů je popsán v rešeršní části práce. Správná volba tenzometru, jeho umístění a kompenzace nežádoucích vlivů by měla vést k získání odpovídajících dat, která nebudou zkreslená a v rozsahu měřicího rozmezí budou přesná. Kromě doporučení a postupů od výrobce by se mělo během měření dbát na příslušné normy a zákony, zabývající se metrologií.

V případě, že měření proběhlo a signál deformace byl pomocí měřicího systému zaznamenán, je možné použít vhodný vyhodnocovací software a přistoupit k použití již popsaných výpočetních modelů. K vyhodnocení je potřeba dokázat stanovit bod, v kterém je známá deformace a v ideálním případě přesná hodnota tlaku, pro vynulování měřeného signálu. U kalibrační metody jsou pak tyto požadavky vyšší, ale to bylo v práci již několikrát zmíněno.

Metoda stanovení tlaku pomocí nalepovacích tenzometrů nedosahuje takových přesností a použitelností jako použití běžného tlakoměru, ale nevyžaduje přípravu tlakového odběru pro tlakový snímač, čímž z pohledu ekonomiky nebo bezpečnosti (jsou místa, kde není možné zasahovat do potrubí za účelem výroby tlakových odběrů) získává výhodu. Především z důvodu nízké přesnosti této metody je jejich použití možné pouze v ojedinělých případech, kdy není nutné znát přesnou hodnotu tlaků, popřípadě, kdy jinak tlak nelze stanovit.

## ZÁVĚR

V předložené diplomové práci je popsána problematika měření tlaku v potrubí pomocí nalepovacích tenzometrů. Toto využití tenzometrů, jakožto snímačů deformace, se jeví jako možný postup při stanovování tlaku v hydraulických systémech. Důvod k upřednostnění tohoto postupu před použitím běžných tlakových snímačů spočívá v obvykle méně náročném umísťování měřicích zařízení. U tlakoměrů je nutné mít připravené tlakové odběry, což může být v řadě případů velmi problémové. Může se jednat o případy, kdy výroba tlakových odběrů je příliš finančně nákladná nebo dokonce je tato výroba neproveditelná. Ukázkové případy pro tyto omezení lze nalézt například v systémech jaderné energetiky.

Zadání této práce bylo rozděleno do pěti bodů, které byly autorem vnímány jako stěžejní body osnovy. To také teoreticky vede k pomyslnému rozdělení práce do oddílů, které ale nelze brát jako samostatné celky, a to z důvodu vzájemné provázanosti.

Prvním cílem práce bylo provést rešerši problematiky. Z důvodu, že nebylo dohledáno v žádné literatuře použití nalepovacích tenzometrů ke stanovení tlaku, tak se tato část zaměřila na vytyčení základních pilířů pro následující odvození výpočetních modelů a popsání samotné problematiky odporové tenzometrie, na jejichž principu fungovaly použité snímače deformace. Třetí kapitola, kterou lze zařadit do rešeršní části práce, v krátkosti popisuje běžné měření tlaku, které sem bylo zařazeno pouze za účelem popsání rozdílu mezi problematikou měření tlaku pomocí tenzometru a pomocí tlakových snímačů. U tenzometrů i tlakoměrů je popsána příprava a umísťování těchto snímačů na potrubí, přičemž jejich odlišnost je hlavním motivačním bodem, proč se zabývat problematikou této práce.

Následující cíl práce se týká experimentu, jehož popisu je věnována celá jedna kapitola. Výstupem experimentu byly změřená data, která se následně vyhodnotila v další kapitole pomocí navržených modelů, čímž bylo možné stanovit hodnoty tlaků z měřené deformace. Pro tento postup byly navrženy tři modely, které se od sebe liší omezeními a určitými předpoklady. Do této části práce byl zahrnut i čtvrtý cíl práce, který spočíval v porovnání vyhodnocených tlaků z přetvoření a měřených tlaků pomocí tlakoměrů. Toto porovnání obsahuje i srovnání výsledků jednotlivých modelů. První dvě odvozené metody, které vycházejí z mechaniky těles a geometrie měřeného systému, byly podrobeny jednoduché citlivostní analýze.

Práce je uzavřena kapitolou zabývající se použitím odvozených metod pro reálný případ, která velkou měrou odkazuje, jak na rešeršní část, tak na výpočetní část práce. Tímto posledním bodem, lze považovat všechny cíle práce za splněné.

Přínos tohoto díla spočívá v popsání funkčních výpočetních modelů tlaku z tenzometrického měření deformace. V další práci by bylo možné provést větší výzkum kalibrační metody, která byla zařazena mezi použité matematicko-technické modely, popřípadě se zaměřit na odvození modelů pro speciální případy, jako je například měnící se osově zatížení.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HORNÍKOVÁ, Jana. *Pružnost a pevnost: Interaktivní učební text*. Brno: CERM, 2003 [cit. 2017-05-17]. ISBN 80-7204-268-8. Dostupné z: <http://beta.fme.vutbr.cz/cpp/>
- [2] JANÍČEK, Přemysl. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2592-x.
- [3] VRBKA, Jan. *Pružnost a pevnost I: Učební text*. Brno, 2012.
- [4] ONDRÁČEK, Emanuel, Přemysl JANÍČEK a Jan VRBKA. *Mechanika těles. Pružnost a pevnost II*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1991, 262 s. ISBN 80-214-0299-7.
- [5] MALINOVSKÝ, Vít. *Teorie konstrukcí: V. - Skořepiny* [online]. 2015 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://mech.fd.cvut.cz/members/malinovsky/teorie-konstrukci>
- [6] Pevnostní výpočty potrubí: Membránový stav napjatosti a jiné vztahy. *Ipotrubi* [online]. 2013 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.ipotrubi.cz/clanky/5.-pevnostni-vypocty-potrubi/3.-tenkostenne-potrubni-komponenty-a-membranovy-stav-napeti/1.-membranovy-stav-napjatosti-a-jine-vztahy.html>
- [7] PLACÁK, Václav a Josef KUNC. *Výpočet napjatosti skořepin*. Praha: SNTL, 1966, 311 s.
- [8] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 8001020576.
- [9] VLK, Miloš et al. *Experimentální mechanika*. Brno, 2003 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/cz/studium/studijni-materialy.html>
- [10] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNÍKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 9788021440104.
- [11] DOKOUPIL, P. *Měření napjatosti ve spirále vodní turbíny pomocí tenzometrů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 144 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.
- [12] TREBUŇA, František a František ŠIMČÁK. *Príručka experimentálnej mechaniky*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2007. ISBN 97808080738167.
- [13] TROJAN, Vítězslav. *Tenzometrická měření*. Brno, 2012. 30 s, CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [14] Snímače tlaku. *EDUMAT* [online]. Kutná Hora [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.edumat.cz/texty/tlak.pdf>
- [15] Snímače a převodníky: Snímače tlaku - principy, vlastnosti a použití. *Odborné časopisy* [online]. FCC PUBLIC [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36290.pdf>
- [16] HABÁN, Vladimír. *MIT – Měření tekutinových systémů* [přednáška]. 2016.
- [17] POHL, Miroslav. *EMS DV 803 rev9: Provozní dokumentace k měřicímu systému*. Brno, 2011.
- [18] HBM. *Strain Gauges*. Provozní dokumentace snímače HBM – 1 XY-6-120.
- [19] HBM. *P3IC / P3ICP: Absolute pressure transducer*. Provozní dokumentace snímače.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A/D	[-]	Analog/Digital
ANSYS	[-]	výpočtový program
cos	[-]	goniometrická funkce kosinus
$C_1$	[MPa]	integrační konstanta
$C_2$	[MPa·m <sup>2</sup> ]	integrační konstanta
$d\varphi_m$	[°]	meridiánový úhel křivosti elementárního prvku
$d\varphi_t$	[°]	obvodový úhel křivosti elementárního prvku
D	[m]	vnitřní průměr potrubí
E	[Pa]	modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
F	[N]	síla
g	[m/s <sup>2</sup> ]	tíhové zrychlení
h	[m]	výška vodního sloupce
k	[-]	deformační součinitel citlivosti (k-faktor)
$k_l$	[-]	deformační součinitel tenzometru ve směru aktivní délky
$k_t$	[-]	deformační součinitel ve směru kolmém na aktivní délku
l	[m]	délka vodiče
$M_y, M_z$	[Nm]	ohybové momenty
$M_{yz}, M_{zy}$	[Nm]	kroucí momenty
n	[-]	normála
N	[N]	normálová síla
$N_m$	[N]	meridiánová síla
$N_t$	[N]	obvodová síla
Obr	[-]	obrázek
$O_m$	[-]	meridiánový střed křivosti
$O_t$	[-]	obvodový střed křivosti
p	[Pa]	tlak
$p_A$	[Pa]	vnitřní tlak
$p_B$	[Pa]	vnější tlak
$p_c$	[Pa]	celkový tlak
$p_d$	[Pa]	dynamický tlak
$p_m$	[Pa]	složka tlaku v meridiánovém směru
$p_n$	[Pa]	složka tlaku v normálovém směru
$p_s$	[Pa]	statický tlak
q	[-]	součinitel příčné citlivosti tenzometru
r	[m]	vzdálenost od středu
$r_m$	[m]	poloměr křivosti v meridiánovém řezu
$r_t$	[m]	poloměr křivosti v obvodovém řezu
R	[m]	poloměr
$R_l$	[m]	vnitřní poloměr potrubí

$R_2$	[m]	vnější poloměr potrubí
$\sin$	[-]	goniometrická funkce sinus
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$S_v$	[m <sup>2</sup> ]	průřez vodiče
txt	[-]	přípona textového souboru
$T$	[N]	posouvající síla
Tab	[-]	tabulka
$T_\varepsilon$	[-]	tenzor přetvoření
$T_\sigma$	[-]	tenzor napětí
$x$	[-]	označení osy v kartézské soustavě souřadnic
$y$	[-]	označení osy v kartézské soustavě souřadnic
$z$	[-]	označení osy v kartézské soustavě souřadnic
$\gamma$	[°]	úhlové přetvoření
$\gamma_t$	[-]	tečná kružnice
$\Gamma$	[-]	střednicová plocha
$\Delta$	[m]	tloušťka stěny potrubí
$\Delta D$	[m]	změna průměru
$\Delta l$	[m]	změna délky
$\Delta R, dR$	[Ω]	změna elektrického odporu
$\Delta S$	[m <sup>2</sup> ]	změna plochy
$\Delta \varepsilon_L$	[μm/m]	vliv hystereze
$\varepsilon$	[μm/m]	poměrná deformace v podélném směru
$\varepsilon_a$	[μm/m]	poměrné přetvoření v meridiánovém směru
$\varepsilon_b$	[μm/m]	poměrné přetvoření v obvodovém směru
$\varepsilon_m$	[μm/m]	poměrné přetvoření v meridiánovém směru
$\varepsilon_t$	[μm/m]	poměrné přetvoření v obvodovém směru
$\mu$	[-]	Poissonovo číslo
$\rho$	[Ωm]	rezistivita (měrný odpor)
$\rho_k$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota kapaliny
$\sigma$	[Pa]	normálové napětí
$\sigma_1$	[Pa]	maximální hlavní napětí
$\sigma_2$	[Pa]	střední hlavní napětí
$\sigma_3$	[Pa]	minimální hlavní napětí
$\sigma_m$	[Pa]	meridiánové (osové) napětí
$\sigma_r$	[Pa]	radiální napětí
$\sigma_t$	[Pa]	obvodové (tečné) napětí
$\tau$	[Pa]	smykové napětí
$\psi$	[μm/m]	poměrná deformace v příčném směru
$\psi_p, \psi_d$	[°]	pomocné úhly u tenzometrických růžic

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Průběhy napětí skořepin (upraveno dle [4])	18
Obr. 1.2: Uvolnění a rovnováha elementárního prvku membránové skořepiny [4]	19
Obr. 1.3: Úplné uvolnění elementárního prvku skořepiny (upraveno dle [4])	20
Obr. 2.1: Hysterezní smyčka (upraveno dle [9])	25
Obr. 2.2: Tenzometrické kříže (upraveno dle [9])	28
Obr. 2.3: Tenzometrické růžice (upraveno dle [9])	29
Obr. 3.1: Tlak	33
Obr. 3.2: Poloha tlakových odběrů v potrubí [16]	34
Obr. 4.1: Schéma měřicí tratě	35
Obr. 4.2: Umístění tenzometru 5 a tlakoměru 1	36
Obr. 5.1: Uvažovaná geometrie	39
Obr. 5.2: Stanovení poloměrů křivosti (upraveno dle [7])	41
Obr. 5.3: Silnostěnné válcové těleso (upraveno dle [4])	44
Obr. 5.4: Tečné a obvodové napětí (ANSYS)	46
Obr. 5.5: Volba kalibračních bodů	54

## SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1: Měřené veličiny	36
Tab. 5.1: Rozměry potrubí a materiálové charakteristiky	39
Tab. 5.2: Ukázková data	40
Tab. 5.3: Výchozí data pro citlivostní analýzu	47
Tab. 5.4: Vliv změny přetvoření a Poissonova čísla	50
Tab. 5.5: Vliv změny tloušťky stěny a vnitřního poloměru (silnostěnný)	52
Tab. 5.6: Vliv změny tloušťky stěny a vnitřního poloměru (tenkostěnný)	52
Tab. 5.7: Hodnoty ke stanovení materiálových charakteristik	57
Tab. 5.8: Stanovené materiálové charakteristiky	57
Tab. 6.1: Směrodatná odchylka	62

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 5.1: Vyhodnocení – tenzometr 2 (tenkostěnný)	42
Graf 5.2: Vyhodnocení – tenzometr 5 (tenkostěnný)	42
Graf 5.3: Tenzometr 2 – rozdílné nulování	43
Graf 5.4: Porovnání obvodových napětí (ANSYS x výpočet)	46
Graf 5.5: Vliv změny $E$	48
Graf 5.6: Vliv změny $\varepsilon_m$	48
Graf 5.7: Vliv změny $\varepsilon_t$	49
Graf 5.8: Vliv změny $\mu$	49
Graf 5.9: Vliv změny $R$	51
Graf 5.10: Vliv změny $\Delta$	51
Graf 5.11: Proložení kalibračních bodů přímkou	54
Graf 5.12: Vyhodnocení – tenzometr 2 (kalibrační)	55
Graf 5.13: Vyhodnocení – tenzometr 5 (kalibrační)	55
Graf 6.1: Porovnání průběhů tlaku (tenzometr 2)	58
Graf 6.2: Porovnání průběhů tlaku (tenzometr 5)	59
Graf 6.3: Porovnání rozdílů tlaků v závislosti na čase (tenzometr 2)	59
Graf 6.4: Porovnání rozdílů tlaků v závislosti na čase (tenzometr 5)	60
Graf 6.5: Porovnání rozdílů tlaků v závislosti na velikosti tlaku (tenzometr 2)	61
Graf 6.6: Porovnání rozdílů tlaků v závislosti na velikosti tlaku (tenzometr 5)	61